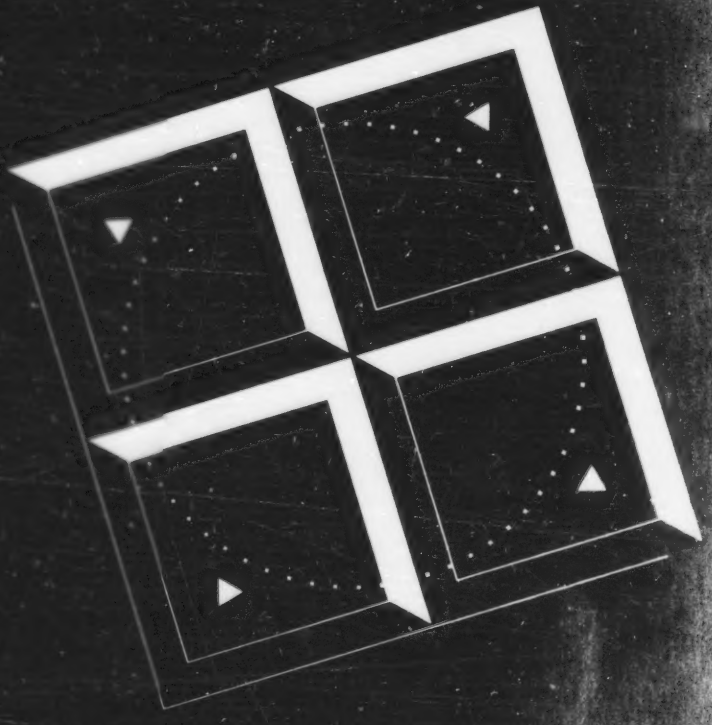
Mémoire de recherche forestière nº 138

Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées

par M.S. Lamhamedi, G. Lambany
M. Renaud, L. Veilleux
et S. Plamondon



Mohammed S. LAMHAMEDI est ingénieur forestier, diplômé de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II du Maroc depuis 1983. En 1985, ce même établissement lui décernait le diplôme d'ingénieur agronome avec une spécialité en sciences forestières. *Ph.D.* en sciences forestières de l'Université Laval en 1991, il a ensuite été tour à tour : enseignant-chercheur à l'IAV Hassan II en écophysiologie et en plantations forestières de 1986 à 1993 ; en stage postdoctoral sur les symbioses racinaires et l'écophysiologie à l'Institut de recherche en biologie végétale de l'Université de Montréal en 1992 ; chercheur visiteur au Centre de foresterie des Laurentides du Service canadien des Forêts à Québec de 1993 à 1995 ; pour la Banque mondiale, directeur scientifique du projet d'installation de trois pépinières pilotes en Tunisie en 1996-1997 (Pampev Internationale et Direction Générale des Forêts, Tunisie) ; attaché au Centre de recherche en biologie forestière (Université Laval), 1998-1999. Il est maintenant chargé de projets à la Direction de la recherche forestière et professeur associé à l'Université Laval. Ses travaux portent sur la physiologie des plants, la production des plants en pépinière et le transfert de technologie concernant la modernisation du secteur des pépinières forestières dans les pays en voie de développement.

Gil LAMBANY est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1976. En 1978, l'Université de Sherbrooke lui décernait le diplôme de maître en environnement. À l'emploi du Ministère depuis 1984, il a été affecté en décembre 1986 au Service de l'amélioration des arbres, à titre de chargé de recherches en physiologie végétale. En septembre 1998, il est passé à la Direction des programmes forestiers.

(suite en C4 ⇒)

Depuis de nombreuses années, chacun des Mémoires et des autres rapports publiés par la Recherche forestière est révisé par un comité *ad hoc* d'au moins trois membres recrutés aussi bien à l'intérieur du Ministère que dans le milieu universitaire, la fonction publique du Canada ou les autres milieux de la recherche. Les responsables de la Recherche forestière remercient les scientifiques qui ont accepté bénévolement de revoir le texte présenté ici et de participer ainsi à la diffusion des résultats des recherches menées au Ministère des Ressources naturelles.

Les publications de la Recherche forestière sont produites et diffusées à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation de chaque projet ou expérience. En conséquence, ces documents sont, par définition, à ***tirage limité*** et à ***diffusion restreinte***.

Adresser toute demande à :

Publications
Direction de la recherche forestière
Forêt Québec, MRN
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (QUÉBEC) G1P 3W8 Canada

Courriel : rech.for@mrn.gouv.qc.ca

101-03151/

M.S. LAMHAMEDI, G. LAMBANI, M. RENAUD, L VEILLEUX ET S. PLAMONDON, 2000.
Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées. Mémoire de recherche forestière n° 138

ERRATA

(page, colonne, paragraphe, ligne)

Tables des matières

p.ix, l.5,Liste des figures	Lire **xiii** au lieu de xi
l.6,Liste des tableaux	Lire **xi** au lieu de xiii

Introduction

p.2,c.2,p.1,l.18	Lire **pourrait**

Chapitre premier

p.3,c.2,l.28	Lire **sont réalisés**
p.5,c.1,p.1,l.4	Lire **2,3 kg/cm^2**
p.6,Figure 2,l.10	Lire **3** au lieu de 4 semis/ température (perte en eau des racines)
p.7,c.2,p.1,l.5	Lire **(125 ml)**
p.8,c.1,p.1,l.18	Lire **(≥ 1cm)** au lieu de (= 1cm)

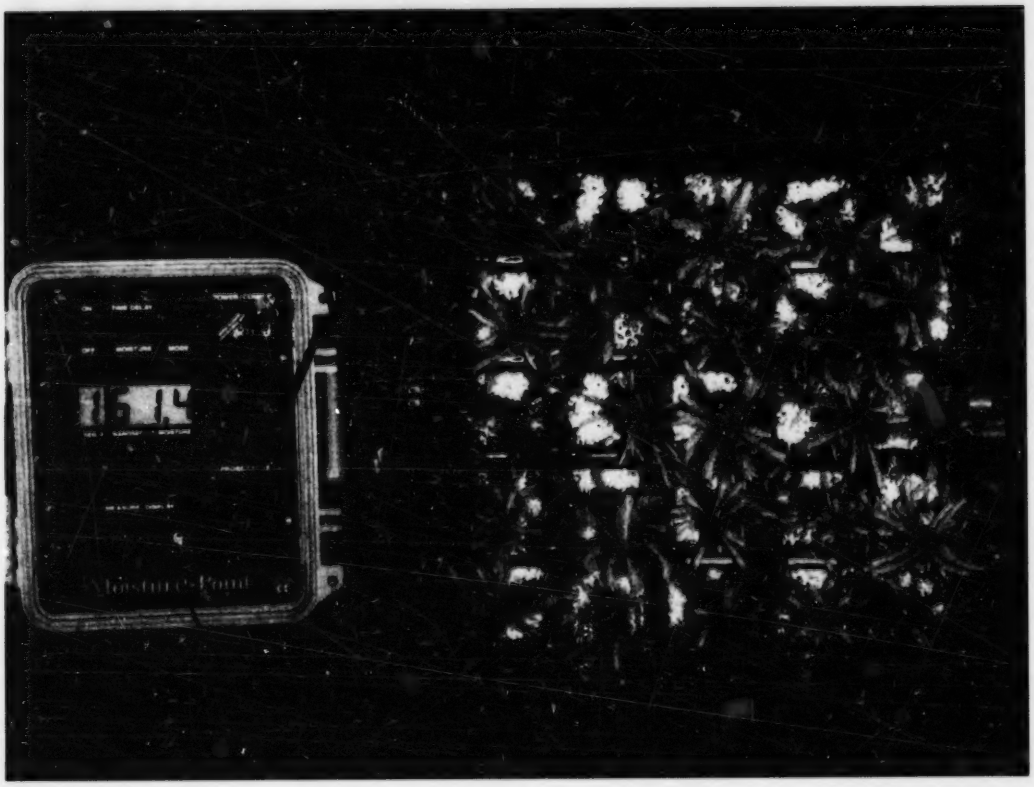
Chapitre deux

p.13,Tableau 2, * l.1	Lire **lettres**
p.14,Tableau 3, * l.1	Lire **issu de**
l.2	Lire **Student**
p.15,c.2,p.2,l.16	Lire **T_1**
p.18,c.1,p.2,l.9	Lire **existante**

Conclusion

p.26,c.1,p.1,l.4	Lire **cette**

Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées



Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées

par

Mohammed S. Lamhamedi
Gil Lambany
Mario Renaud
Linda Veilleux
et
Serge Plamondon
Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie

Mémoire de recherche forestière nº 138

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles
Forêt Québec
Direction de la recherche forestière
2000

Ce texte est un rapport partiel des projets de recherche n^{os} 0204-271S « Développement d'un outil de gestion de l'irrigation en pépinière » et 0204-272S « Contrôle du gel des racines et de la dessiccation des tiges dans les productions de plants en récipient ».

2000-3092

ISBN 2-550-36249-7
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
© 2000 Gouvernement du Québec

Avant-propos

Ce document est un rapport partiel de projets élaborés par M. Gil Lambany et réalisés entièrement sous sa supervision lorsqu'il était chargé de recherche à la Direction de la recherche forestière. Les expériences qui y sont décrites ont été réalisées à la pépinière forestière de Grandes-Piles en 1996 et 1997.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'équipe technique de la pépinière de Grandes-Piles pour le soutien qu'elle nous a apporté lors de nos travaux, et plus particulièrement M. Michel Beauchesne pour son aide précieuse lors des suivis des teneurs en eau.

Nous adressons aussi nos remerciements à toute l'équipe du laboratoire de chimie inorganique de la Direction de la recherche forestière, pour l'analyse des échantillons de substrats et tissus, ainsi qu'à l'équipe de biométrie pour les analyses statistiques.

Nous remercions également : M. Hank Margolis de l'Université Laval, Mme Michèle Tourigny de la Direction de la production des semences et des plants et M. Benoit-Marie Gingras de la DRF, pour la révision de ce document ; M. Fabien Caron pour sa révision complète et son édition.

Résumé

Au Québec, l'utilisation des récipients à parois ajourées (*25-350A*) pour produire des plants de fortes dimensions a modifié la gestion de l'irrigation. Pour ce type de production, les pépiniéristes tendent à maintenir des teneurs en eau élevées dans le substrat variant entre 50 % et 60 % (volume/volume). Pour mieux contrôler l'irrigation dans ce type de récipient et plus particulièrement les teneurs en eau au niveau de la rhizosphère, nous avons utilisé le *MP-917* dont le fonctionnement s'appuie sur le principe de la réflectométrie dans le domaine temporel. À l'aide de cet appareil, nous avons pu maintenir deux régies d'irrigation constantes de 25 % et de 40 % (v/v) durant la saison de croissance active des semis d'épinette blanche (1+0) produits dans des récipients à parois ajourées sous tunnel. Nos résultats ont démontré clairement que le *MP-917* est une technique d'évaluation de la teneur en eau au niveau de la rhizosphère non destructive, stable, rapide, simple, très précise, reproductible et qui permet d'échantillonner un grand nombre de cavités. Le maintien d'une différence de 15 % (v/v) entre les deux régies n'a pas eu d'effet significatif sur les variables morphologiques (hauteur, diamètre au collet, masses sèches des racines et de la partie aérienne) et sur l'architecture des racines (longueur totale des racines, diamètre moyen des racines et surface des racines) évaluées en fin de la première saison de croissance. Par contre, ces deux régies d'irrigation ont modifié de façon significative la fertilité du substrat et les concentrations des éléments minéraux dans les racines et dans la partie aérienne. À la fin de la deuxième saison de croissance, l'évaluation des variables morphologiques n'a pas révélé de différences significatives entre les deux régies d'irrigation appliquées en première saison de croissance. La comparaison des moyennes n'a révélé également aucune différence significative entre les deux régies d'irrigation quant à leur effet sur les variables de tolérance au gel (perte en eau des racines, capacité de croissance des racines, libération des électrolytes, teneur en eau et qualification visuelle des dommages de la partie aérienne) évaluées durant l'automne sur des semis d'épinette blanche (1+0). Les tests standards d'évaluation des dommages causés par le gel aux racines et à la partie aérienne pourraient être éventuellement utilisés dans les programmes opérationnels de qualification des plants. Les résultats de ce projet de recherche sont discutés en relation avec la diminution du lessivage des minéraux dans les eaux souterraines et l'amélioration de l'endurcissement et de la tolérance au gel des semis.

Mots-clés : épinette blanche, *Picea glauca*, gestion de l'irrigation, réflectométrie dans le domaine temporel, récipients à parois ajourées, plants de fortes dimensions, croissance, nutrition minérale, fertilité du substrat, endurcissement, tolérance au gel.

Abstract

Managing greenhouse irrigation and evaluating white spruce seedlings grown in air-slit containers. *In Québec, the use of air-slit containers (25-350A) for the production of large seedlings has resulted in major alterations in irrigation management. For this type of seedling production, nurserymen tend to maintain high substrate water contents between 50 and 60 % (v/v). To better control irrigation, and particularly the water content of the rhizosphere, we adapted a* MP-917, *which is based on the principles of time domain reflectometry, to manage irrigation during the growing season. Using this apparatus, white spruce seedlings (1+0) grown in air-slit containers in a tunnel were maintained under two different irrigation regimes (25 % and 40 % v/v) during the growing season. Our results showed clearly that the use of a* MP-917 *is a non destructive technique which is simple to use and produces quick, accurate, and reproducible results. It also allows high number of cavities to be sampled. Maintaining a 15 % (v/v) difference between the two irrigation regimes did not have any significant effect on morphological variables (height, root-collar diameter, dry weight of roots and shoot) and root architecture (total length, diameter and surface area of roots) evaluated at the end of the first growing season. In contrast, the two irrigation regimes had a significant effect on soil fertility and root and shoot mineral concentrations. At the end of the second growing season, the evaluation of morphological variables did not show significant differences between the two irrigation regimes applied during the first growing season. The comparisons of the means did not reveal any significant differences between the two irrigation regimes in terms of their effects on frost hardiness variables (root water loss, root growth capacity, electrolyte leakage, water content, and visual assessment of damaged shoots) of white spruce seedlings (1+0) evaluated during the autumn. These standard tests for evaluating frost-damaged shoots and roots could be used in evaluating seedling quality. The results of this project are discussed in relation to decreased leaching of mineral nutrients into the ground water and improved hardening and frost tolerance of seedlings.*

Key words : white spruce, Picea glauca, *irrigation management, time domain reflectometry, air-slit containers, large seedlings, growth, mineral nutrition, substrate fertility, hardening, frost hardiness.*

Table des matières

Avant-propos v

Remerciements v

Résumé vii

Abstract viii

Liste des figures xi

Liste des tableaux xiii

Introduction 1

Chapitre premier

Matériel et méthodes 3

1.1 Matériel végétal et dispositif expérimental 3

1.2 Contrôle de l'irrigation 3

1.3 Variables environnementales 5

1.4 Statut nutritionnel et variables morphologiques des plants 5

1.5 Calendrier de fertilisation et suivi de la fertilité du substrat 5

1.6 Tolérance au gel 6

1.7 Perte en eau des racines 7

1.8 Teneur en eau 7

1.9 Libération des électrolytes 7

1.10 Capacité de croissance des racines et qualification des dommages de la partie aérienne 8

1.11 Analyses statistiques 8

Chapitre deux

Résultats 9

2.1 Variables environnementales 9

2.2 Teneurs en eau et quantités d'eau utilisées 9

2.3 Variables morphologiques 9

2.4 Statut nutritionnel des plants 12

2.5 Fertilité du substrat 15

2.6 Tolérance au gel 15
2.6.1 Pertes en eau des racines 15
2.6.2 Capacité de croissance des racines 15
2.6.3 Libération des électrolytes par les apex de la partie aérienne 18
2.6.4 Teneur en eau 20
2.6.5 Qualification visuelle des dommages de la partie aérienne (indice de Jian) 20

Chapitre trois

Discussion 21

Conclusion 25

Références bibliographiques 27

Annexe I. Dispositif expérimental implanté dans le tunnel 21 à la pépinière de Grandes-Piles en 1996 33

Annexe II. Variations des dommages foliaires (Indice de Jian) des plants d'épinette blanche durant l'automne en fonction des régies d'irrigation (25 % et 40 %, v/v) et des températures de congélation 35

Liste des tableaux

Tableau 1. Variables morphologiques (moyenne ± écart type) des semis d'épinette blanche soumis à deux régies d'irrigation (25 % et 40 %, v/v) en (1+0), évalués à la fin des deux premières saisons de croissance 12

Tableau 2. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur les concentrations des éléments nutritifs dans les parties aériennes et des racines des semis de *Picea glauca* (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées 13

Tableau 3. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur la fertilité du substrat et la conductivité électrique lors de la production des semis de *Picea glauca* (1+0) dans les récipients à parois ajourées 14

Tableau 4. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur le pourcentage de perte en eau des racines des semis d'épinette blanche (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées 16

Tableau 5. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur la capacité de croissance des racines des semis d'épinette blanche (1+0) en réaction à différentes températures de congélation 17

Tableau 6. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur la libération des électrolytes des parties aériennes des semis d'épinette blanche (1+0) en réaction à différents traitements de gel 19

Tableau 7. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur la teneur en eau des parties aériennes et des racines des semis de *Picea glauca* (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées 20

Liste des figures

Figure 1. Appareil de mesure (*MP-917*) de la teneur en eau du substrat et insertion d'une sonde dans un récipient à parois ajourées (*25-350A*) 4

Figure 2. Modalités d'échantillonnage et évaluation des variables de tolérance au gel 6

Figure 3. Évolution des températures moyennes (air, substrat et au ras des plants) (1a) et de l'humidité relative moyenne (1b) dans le tunnel lors de la saison de croissance des semis d'épinette blanche (1+0) produits en récipients à parois ajourées (*25-350A*) 10

Figure 4. Évolution des teneurs moyennes en eau dans le substrat (tourbe/vermiculite) soumis à deux régies d'irrigation (25 % et 40 %, v/v) durant la saison de croissance des semis d'épinette blanche (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées (*25-350A*) à la pépinière de Grandes-Piles en 1996 11

Figure 5. Quantité d'eau cumulative (mm) utilisée pour maintenir les teneurs en eau cibles (25 % et 40 %, v/v) dans le substrat (tourbe / vermiculite) durant la saison de croissance des semis d'épinette blanche (1+0) (*Picea glauca*) produits dans les récipients à parois ajourées (*25-350A*) 11

Figure 6. Relation curviligne entre les pertes en eau des racines et le nombre de nouvelles racines blanches formées lors du test de capacité de croissance racinaire 18

Introduction

Dans le cadre de la stratégie de la protection des forêts (MRN 1994), le ministère des Ressources naturelles du Québec a opté pour l'utilisation des plants de fortes dimensions (PFD) dans les programmes de reboisement (Gingras 1993, Jobidon *et al.* 1998, Lamhamedi *et al.* 1998) afin de limiter les interventions de dégagement dans les plantations caractérisées par une forte compétition. Au Québec, la production de PFD a commencé par l'utilisation des récipients à parois fermées. Ceux-ci causent souvent un développement compact des racines (Lamhamedi *et al.* 1997). Ce type d'architecture des racines réduit d'une façon significative l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs (Baldwin *et al.* 1972, Tinker 1976). De plus, ces récipients peuvent causer des déformations racinaires (Gingras et Richard 1999) tout en rendant les plants plus vulnérables aux différents stress environnementaux. Pour pallier à ces problèmes, le ministère des Ressources naturelles a entrepris un programme de recherche axé sur la mise au point de récipients à parois ajourées (Gingras 1993, Gingras et Richard 1999) ; ces récipients sont munis de fentes verticales qui favorisent le cernage aérien des apex racinaires et la formation de racines traçantes dont l'architecture s'apparente à celle qu'on rencontre généralement sur des semis croissant dans des conditions naturelles.

La production de PFD dans des récipients à parois ajourées nécessite un réajustement des régies de culture pour atteindre les standards morphologiques et physiologiques des semis. Un des éléments clés pour y arriver est de définir des teneurs en eau qui tiennent compte des différents stades phénologiques tout au long de la première saison de croissance (Lambany *et al.* 1996, 1997, Veilleux *et al.* 1998). Timmer et Miller (1991) ont montré que la croissance, le statut nutritionnel et les relations hydriques des semis du pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.) sont plus affectés par la régie d'irrigation que par la fertilisation. De récents travaux indiquent que des régies d'irrigation modérées (entre 29 à 53 % de teneur volumétrique en eau) induisent des conditions optimales de croissance, de développement des bourgeons, de nutrition minérale et de réserves en amidon chez les plants du douglas (Khan *et al.* 1996).

Le dessèchement rapide du substrat (mélange de tourbe et de vermiculite) dans les récipients à parois ajourées rend la gestion de l'irrigation fort complexe. À cet égard, les pépiniéristes tendent à augmenter les teneurs en eau du substrat à des niveaux souvent supérieurs à 50 % (v/v). Ces irrigations fréquentes sont accompagnées généralement d'une fertilisation accrue afin d'atteindre les standards de croissance souhaités durant les deux saisons de croissance. Ce type de gestion de l'irrigation peut entraîner des pertes importantes d'éléments minéraux par lessivage et contribuer ainsi à la pollution de la nappe phréatique. Nos connaissances actuelles restent très limitées quant aux teneurs optimales en eau à maintenir dans les substrats tourbeux pour produire des semis dans des récipients à parois ajourées. À cet égard, nous allons comparer les effets d'une régie d'irrigation de 40 % (v/v), considérée comme teneur en eau minimale par la majorité des pépinières qui utilisent les récipients à parois ajourées (Lambany *et al.* 1997), à celle d'une régie d'irrigation relativement faible 25 % (v/v). La croissance, l'évolution de la fertilité du substrat, le statut nutritionnel et la tolérance au gel des semis durant la première saison de culture permettent de mesurer l'effet de ces deux traitements. Généralement, la quantité d'eau et la durée d'arrosage sont déterminées dans la plupart des pépinières sur une base tactile, visuelle ou gravimétrique. Pour optimiser l'irrigation et en vue de développer un outil opérationnel de mesure, l'accent a été mis, depuis 1990, sur l'adaptation des principes de la réflectométrie dans le domaine temporel à la gestion de l'irrigation dans les récipients à parois ajourées, couplée à un contrôle de la fertilité du substrat (Lambany *et al.* 1996, Gingras *et al.* 1999). Comparativement aux autres techniques générales d'évaluation (chambre à

pression, blocs de gypse, psychromètre, tensiomètre et méthode gravimétrique), la réflectométrie reste une technique précise, rapide et stable et permet d'échantillonner un grand volume de substrat, ce qui diminue ainsi les interférences dues à l'hétérogénéité (RUNDEL et JARRELL 1991).

Les récipients à parois ajourées ont une conductivité thermique élevée en comparaison des récipients à parois fermées, ce qui favorise le transfert rapide du froid à l'intérieur de la motte à cause de la présence de fentes verticales dans chaque cavité. En plus, l'élaboration de régies de fertilisation et d'irrigation spécifiques à ces récipients peut influencer la tolérance au gel des semis. Par exemple, la diminution de l'irrigation vers la fin de la saison de croissance peut produire un stress hydrique chez les semis qui induit la formation des bourgeons et l'arrêt de croissance nécessaires au déclenchement de la phase d'endurcissement (DURYEA et MCCLAIN 1984). La tolérance au gel est améliorée par l'augmentation de la concentration en azote dans les aiguilles et, de façon moindre, par celles du phosphore et du potassium (RIKALA et REPO 1997). L'effet du statut nutritionnel sur la tolérance des semis au gel est intimement lié à l'état d'endurcissement des semis (HELLERGREN 1981).

Au Québec, les pertes occasionnées par le gel à l'automne et au printemps peuvent être importantes en fonction de la sévérité du gel dans chaque zone écologique. Contrairement aux effets du gel sur la partie aérienne où les symptômes sont apparents, l'ampleur des dommages causés par le gel au niveau des racines reste difficile à évaluer avec précision avant la plantation. Différents tests de qualité ont été mis au point en vue de déterminer l'intégrité fonctionnelle des semis et de prédire leur survie et leur croissance en plein champ (GROSSNICKLE et FOLK 1993). L'objectif de ces tests est d'éliminer les semis qui ne possèdent pas certains standards physiologiques de performance minimale. Ceux-ci peuvent conférer aux plants une meilleure survie même sur des sites relativement défavorables (SUTTON 1988). Différents tests de viabilité sont utilisés pour évaluer l'état physiologique et les dommages causés par le gel aux semis. Ainsi, la libération des électrolytes par les racines ou par les apex de la partie aérienne (FLINT *et al.* 1967, COLOMBO *et al.* 1984, MURRAY *et al.* 1989, BIGRAS et CALMÉ 1994, GROSSNICKLE *et al.* 1998), le pourcentage de pertes en eau (CALMÉ *et al.* 1993, RITCHIE 1990), la teneur en eau (CALMÉ *et al.* 1993), l'indice de dommages (COLOMBO *et al.* 1984, COLOMBO 1994, JIAN 1992) et la capacité de croissance des racines (COLOMBO et GLERUM 1984, SIMPSON 1990) sont des méthodes d'évaluation simples, non coûteuses et qu'on pourraient peut-être adapter aux conditions de fonctionnement en pépinière pour mieux évaluer la qualité des lots de plants produits. Cependant, il est nécessaire de valider ces tests en fonction des essences et des régies de culture des semis produits dans les récipients à parois ajourées. Dans ce projet, en plus de la croissance et de la nutrition minérale des plants, nos tests évaluent la tolérance au gel en émettant l'hypothèse que la régie d'irrigation 25 % (v/v) peut induire un meilleur degré d'endurcissement que la régie 40 % (v/v).

Les objectifs assignés à cette étude sont de i) tester la fiabilité du *MP-917* pour contrôler les teneurs en eau du substrat tourbeux durant la saison de croissance et ii) de comparer les teneurs en eau de 25 % et 40 % (v/v) quant à leur effet sur la croissance, la fertilité du substrat, le statut nutritionnel et la tolérance au gel des semis en automne.

Chapitre premier

Matériel et méthodes

1.1 Matériel végétal et dispositif expérimental

L'ensemencement des graines d'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss, provenance 94P64) s'est fait le 9 mai 1996 dans des récipients à parois ajourées (*IPL 25-350A*, 25 cavités par récipient, 350 cm^3 par cavité ; Saint-Damien, Québec). Le substrat utilisé était un mélange standard à base de tourbe et de vermiculite, préalablement humecté (rapport v/v : 3/1) et ajusté à une densité approximative de 0,11 g/cm^3. Après l'éclaircie et le repiquage, les plants ont été soumis à deux régies d'irrigation (25 % et 40 %, cm^3 H_2O/cm^3 substrat) durant la saison de croissance, ce qui correspond respectivement à 43 % et à 57 % du poids du récipient à saturation. Chaque traitement a été répété six fois dans un dispositif aléatoire implanté dans le tunnel numéro 21, recouvert d'un polythène blanc, de la pépinière de Grandes-Piles (Annexe 1). Chaque unité expérimentale était séparée du traitement suivant par une zone tampon constituée de 54 récipients afin d'éliminer l'effet de bordure. Pour chaque régie d'irrigation et pour chaque répétition, on a utilisé 72 récipients dont 16 installés en bordure. Les deux régies d'irrigation ont été maintenues constantes pour une période de 15 semaines allant de la mi-juillet jusqu'à la fin du mois d'octobre 1996.

Lors de la deuxième saison de croissance, on a soumis tous les plants à la même régie de culture que les plants de la production régulière de la pépinière de Grandes-Piles. En novembre 1997, 150 plants par régie (25 plants par répétition) ont été choisis aléatoirement pour vérifier si les teneurs en eau maintenues pendant la première année de croissance en tunnel avaient eu un effet significatif sur les variables morphologiques de ces plants d'épinette blanche (2+0).

1.2 Contrôle de l'irrigation

Le suivi des teneurs en eau du substrat au niveau de la rhizosphère s'est fait par le *MP-917* (ESI Environmental Sensors Inc., Victoria, C.-B.) dont le principe est basé sur la réflectométrie dans le domaine temporel (Topp *et al.* 1980, 1982, 1984). Le fonctionnement du *MP-917* est décrit en détail dans le manuel d'utilisation du fabricant (ESI 1994). Dans chaque répétition, trois sondes à double diode sont utilisées, deux étant implantées dans la partie centrale du bloc (56 récipients) alors que la troisième est installée dans la bordure extérieure du bloc où l'assèchement est plus fréquent, pour un total de 18 sondes par régie d'irrigation. Dans la partie centrale du bloc, neuf récipients ont été choisis aléatoirement afin de mesurer leur teneur en eau moyenne, et on a sélectionné les deux récipients dont la teneur en eau se rapproche le plus de cette moyenne, où des sondes ont été insérées d'une façon permanente. Chaque sonde, constituée de deux tiges parallèles en acier inoxydable (longueur 390 mm, diamètre 3,17 mm) (Figure 1), est insérée horizontalement au niveau des fentes de cinq cavités adjacentes à mi-hauteur du récipient (Lambany *et al.* 1996, 1997). L'estimation des teneurs en eau tient compte de l'alternance du contact des tiges avec l'air et le substrat (Lambany *et al.* 1997). Le suivi des teneurs en eau et l'ajustement des deux régies d'irrigation est réalisé trois fois par semaine (lundi, mercredi et vendredi). Pour chaque sonde, on effectue deux mesures successives afin de vérifier la stabilité des lectures des teneurs en eau. Lorsque l'écart entre les deux valeurs obtenues dépasse 2 % (v/v), on fait une troisième lecture ; ce sont les deux données successives les plus semblables qui servent au calcul de la moyenne pour chaque régie d'irrigation. L'uniformité des régies d'irrigation, à l'intérieur de

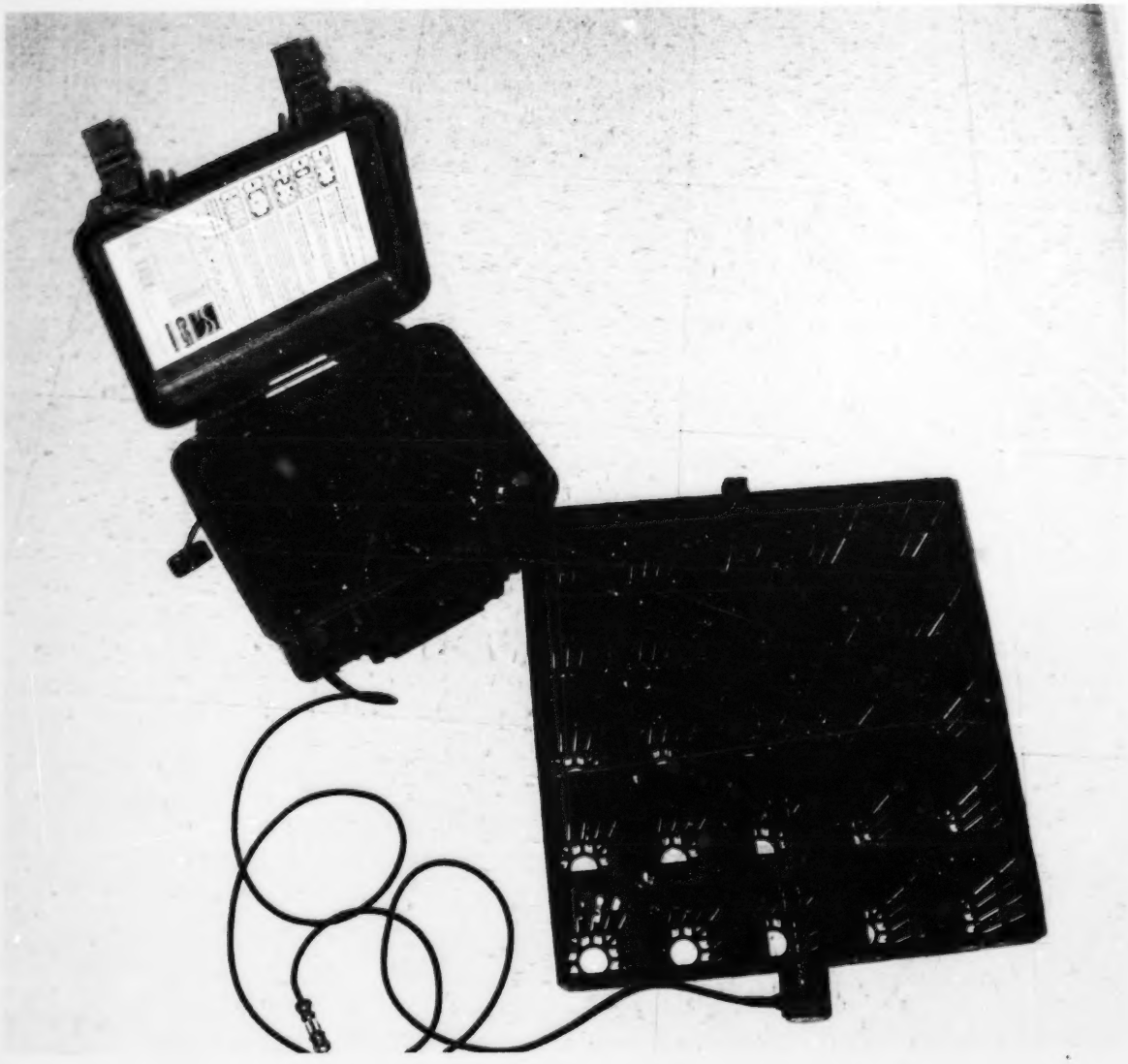


Figure 1. Appareil de mesure (MP-917) de la teneur en eau du substrat et insertion d'une sonde dans un récipient à parois ajourées (*25-350A*).

chaque répétition, est assurée par l'utilisation d'un robot d'arrosage motorisé (modèle *Aquaboom Harnois*, Québec) muni de 22 buses d'arrosage et fonctionnant à une pression de 2,3 kg/cm^3 (32 *lb/po*^{2}). Trente minutes après l'irrigation, on procède à une deuxième détermination des teneurs en eau au moyen du *MP-917* afin de s'assurer du maintien de la teneur cible en eau dans chaque répétition. Les observations préliminaires indiquent qu'une durée de 30 minutes après l'irrigation est suffisante pour atteindre une stabilité des teneurs en eau dans le substrat de culture. On a installé un pluviomètre par régie d'irrigation (modèle *TE 525M*, Texas Electronics) afin de mesurer les quantités d'eau appliquées lors des arrosages et des fertilisations.

1.3 Variables environnementales

Les températures du substrat, de l'air à 2 m et au niveau des plants ainsi que l'humidité relative de l'air dans le tunnel sont consignées dans un système d'acquisition de données (modèle *CR-10*, Campbell Scientific, Edmonton, Canada) à l'aide de sondes de température (modèle *107B*) et d'humidité relative (modèle *HMP 35C*).

1.4 Statut nutritionnel et variables morphologiques des plants

De la fin juillet à la mi-octobre 1996, cinq dates d'échantillonnage ont été retenues (29 juillet, 19 août, 3 et 16 septembre et 21 octobre) afin d'évaluer la variation saisonnière des concentrations en éléments minéraux des parties aériennes et des racines (N, P, K, Ca et Mg) ainsi que les variables morphologiques (hauteur, diamètre, masse sèche des racines et de la partie aérienne). Pour chaque date d'échantillonnage, quinze plants par répétition et par régie sont récoltés avec leur substrat, pour un total de 90 plants par régie. La masse de la partie aérienne et des racines est déterminée par groupe de trois plants après un séchage de 48 heures dans une étuve à 60 °C.

L'évaluation de l'architecture des racines est faite uniquement lors de la dernière date d'échantillonnage à l'aide d'un système intégré de numérisation et d'analyse d'images (*WinRhizo*, Instruments Régent inc., Québec). La méthode de mesure est décrite en détail par Lambany et Veilleux (1999). La variable « classes des racines » correspond à la somme des longueurs de toutes les racines appartenant à une classe de diamètre spécifique. Pour ce type de plants, on a défini 20 classes de diamètre réparties de 0 à 2 mm avec un intervalle régulier de 0,1 mm.

1.5 Calendrier de fertilisation et suivi de la fertilité du substrat

Le calendrier de fertilisation a été déterminé par l'équipe technique de la pépinière de Grandes-Piles et correspond au calendrier en usage à la pépinière pour l'épinette blanche 1+0 cultivée dans des récipients à parois ajourées *25-350A* sous tunnel. Durant la saison 1996, chaque plant a reçu respectivement 75,5, 24,2 et 48,5 mg de N, P et K.

La fertilité du substrat en éléments minéraux (N, P et K) est déterminée à la suite d'un échantillonnage dans les différentes régies d'irrigation. Pour chacune des cinq dates d'échantillonnage, le substrat de 15 cavités par répétition est regroupé pour former un échantillon composite, soit six échantillons composites de substrat à analyser pour chaque régie d'irrigation.

Pour l'azote, l'échantillon de tissus est minéralisé à l'acide sulfurique en présence de sélénium et de peroxyde dans des tubes de digestion à 370 °C. Quant au substrat tourbeux, le dosage est fait après extraction à l'eau par compression (Langlois et Veilleux 1988). Par la suite, on détermine l'azote (sous forme d'ammonium) en utilisant un spectrophotomètre à flux continu (modèle *QuickChem 8000*, Lachat Instruments, Milwaukee, WI, USA). Les autres éléments (P, K, Ca et Mg) sont directement dosés dans la solution d'acide sulfurique diluée, à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique au plasma (modèle *ICAP 9000*, Thermo Instruments, Franklin, Ma, USA). Les méthodes d'analyse de ces éléments minéraux sont décrites en détail par Walinga *et al.* (1995).

La conductivité du substrat tourbeux a été déterminée en utilisant un rapport tourbe/eau de 1/20 à l'aide d'un conductivimètre (modèle *CDM83*, Radiometer, Copenhague, Danemark). Elle a été mesurée directement dans la solution du sol de la pâte saturée selon la procédure décrite par Kaira et Menard 1992.

Les analyses minérales du substrat et des plants ont été effectuées par le laboratoire de chimie inorganique du Service des expertises scientifiques, de liaison et de coordination de la Direction de la recherche forestière.

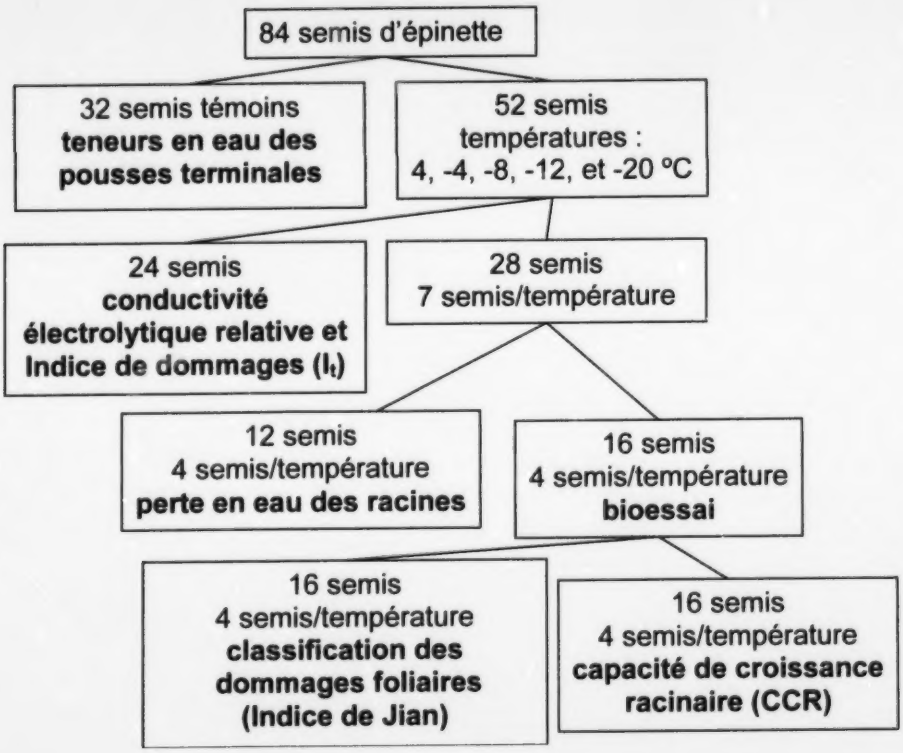


Figure 2. Modalités d'échantillonnage et évaluation des variables de tolérance au gel.

1.6 Tolérance au gel

Au cours de l'automne (fin septembre à mi-novembre), cinq échantillonnages (23 septembre, 7 octobre, 21 octobre, 4 novembre et 18 novembre 1996) ont été réalisés afin de mesurer le pourcentage de pertes en eau des racines, la capacité de croissance des racines (CCR), la libération des électrolytes de la partie aérienne, l'indice visuel de qualification des dommages causés par le gel à la partie aérienne des plants selon l'indice de JIAN (1992) et la teneur en eau de la parties aérienne et des racines. Contrairement à l'utilisation des aiguilles détachées pour évaluer la tolérance au gel, ces variables sont évaluées sur la partie aérienne entière dans le cas des plants (1+0), toutes les racines ou l'ensemble du plant afin d'établir une meilleure approximation de la tolérance au gel (GLERUM 1985). Dans ce mémoire, nous utilisons la définition de tolérance au gel retenue par LEVITT (1980), soit l'état physiologique des semis qui leur permet de tolérer des basses températures sans dommages visibles.

Avant le début des tests de congélation, les plants sont stockés dans un réfrigérateur à une température de 4 °C. L'échantillonnage des plants a été effectué uniquement dans quatre blocs choisis préalablement au hasard. Par la suite, les plants sont divisés en deux lots distincts (Figure 2) :

- le premier lot, constitué de huit plants par répétition (32 plants par régie) et non soumis aux températures de congélation, est utilisé afin de mesurer, pour chacune des régies d'irrigation, la teneur en eau (rapport masse sèche/masse fraîche) de la partie aérienne et des racines ;
- le deuxième lot est utilisé pour les tests de congélation. Les plants sont soumis à cinq traitements de congélation : témoin (T_0), c'est-à-dire non soumis au traitement, -4 °C (T_1), -8 °C (T_2), -12 °C (T_3) et -20 °C (T_4). On atteint ces températures en utilisant un congélateur (modèle *T20RS*, Tenney Environmental Inc., Williamsport, PA, USA) muni d'un contrôleur de programmation (modèle

Versa Tenn II, Union, New Jersey, É.-U.) avec un taux de refroidissement de 2 °C/heure. Lors de gels printaniers ou d'automne, la température de l'air diminue, en moyenne à l'échelle mondiale, à un taux de 1 à 2 °C par heure (Levitt 1980, Palta et Weiss 1993). Lorsque la température cible est atteinte, elle est maintenue pendant une heure. Afin de valider ce programme de température et de s'assurer du bon fonctionnement du congélateur, quatre sondes de température (modèle *107B*) sont placées dans des sacs de plastique distincts à l'intérieur du congélateur. Un appareil d'acquisition de données (modèle *CR-10*, Campbell Scientific, Edmonton, Alberta) enregistre les températures toutes les trois minutes. Le test de congélation complété, les plants sont gardés à une température de 4 °C au réfrigérateur avant qu'on entreprenne les tests de qualification.

1.7 Perte en eau des racines

Le pourcentage de pertes en eau des racines est évalué sur un échantillon de trois plants par combinaison des répétitions des régies d'irrigation et des traitements de congélation, soit 12 plants par température de congélation (Figure 2). L'évaluation se fait par différence de pesées, selon la procédure décrite par Ritchie (1990). Nos essais préliminaires en laboratoire montrent qu'une combinaison pression-temps de 1 MPa maintenue pendant 10 minutes dans une chambre à pression (PMS Instruments Co., Corvallis, OR, É.-U.), suivie d'une dépressurisation lente, permet d'obtenir une bonne distinction entre les semis témoins et les semis stressés.

1.8 Teneur en eau

Le suivi des teneurs en eau des pousses terminales et des racines a été effectué pour quatre dates d'échantillonnage durant le mois d'octobre 1998 dans le but d'évaluer l'état d'endurcissement des plants. À chaque date d'échantillonnage et pour chaque régie d'irrigation, 32 plants sont récoltés en vue de déterminer les poids frais et sec des pousses terminales et des racines. Les masses de la partie aérienne et des racines sont déterminées par groupe de 8 plants après un séchage de 48 heures dans une étuve à 60 °C. Par la suite, la teneur en eau est calculée en utilisant le rapport :

(poids sec/poids frais) * 100.

1.9 Libération des électrolytes

La libération des électrolytes par la partie aérienne est évaluée sur 24 apex (3 à 5 cm) pour chaque température de congélation (Figure 2). Les apex sont groupés par six et placés dans des erlenmeyers (25 ml) après avoir été rincés trois fois à l'eau distillée. Une fois le test de congélation (témoin, T_1, T_2, T_3, et T_4) terminé, les étapes suivantes sont effectuées :

- saturation de chaque échantillon pendant une nuit à une température de 4 °C dans de l'eau distillée dont la conductivité est connue ;
- mesure de la conductivité électrolytique (mSiemens/cm) de chaque échantillon (EC_1) à l'aide d'un conductivimètre (modèle *160, Conductivity meter*, Orion Research Inc., Boston, MA, É.-U.) ;
- destruction des cellules des échantillons à l'autoclave à une température de 121 °C pendant 15 minutes ;
- refroidissement et équilibre ionique pendant une nuit complète à une température de 4 °C ;
- détermination de la conductivité électrolytique (EC_2).

La conductivité électrolytique relative de chaque échantillon est calculée ainsi :

$$(EC_1/EC_2) * 100.$$

L'utilisation de la conductivité électrolytique relative permet d'éliminer les effets causés par les dimensions et le statut nutritionnel de l'échantillon. Les membranes des tissus endommagés par le gel permettent le passage du contenu cellulaire en électrolytes dans l'eau apoplastique (intercellulaire). Généralement, ce transfert est facilité par une perte de perméabilité de la membrane plasmique (Ritchie 1991). Une conductivité élevée indique donc clairement que les dommages dus au gel sont sévères. À l'aide de ces données, on a déterminé l'indice de dommages (I_t), calculé à partir des conductivités électrolytiques des plants ayant subi un gel et des plants témoins (Colombo *et al.* 1984, Flint *et al.* 1967). Cet indice montre l'importance des dommages selon la sévérité du gel. Ainsi, un indice élevé de dommages signifie que la tolérance au gel est faible et que les dommages causés aux plants seront élevés. Par contre, un indice faible ($I_t < 1$) indique que les plants tolèrent la température de congélation à laquelle ils sont soumis (Jian 1992).

1.10 Capacité de croissance des racines et qualification des dommages de la partie aérienne

Afin de tester l'influence de chaque température de congélation sur la vigueur des racines, un échantillon de quatre plants issus de chacune des répétitions des régies d'irrigation et des traitements de congélation a été rempoté dans des pots remplis d'un mélange standard de tourbe et de vermiculite (rapport v/v 3/1) préalablement humecté, soit un total de 16 plants par température. Les plants sont mis en serre pendant 21 jours et répartis aléatoirement dans quatre blocs. Les températures de jour et de nuit sont fixées respectivement à 25 °C et 18 °C, avec une photopériode de 18 heures maintenue avec lumière d'appoint fournie par des lampes au sodium à haute pression de 400 W (Lumiponic Inc., Montréal). Pendant la durée du bio-essai, on ajoute selon le besoin des irrigations d'appoint sans apport de fertilisants. Le nombre de nouvelles racines blanches (= 1 cm) de chaque plant est déterminé en fonction de la régie d'irrigation et des températures de congélation. Par la suite, on effectue une qualification des dommages de la partie aérienne en utilisant l'indice (classes de dommages de 0 à 5) mis au point par Jian (1992) :

Classe 0 : aucun dommage à la partie aérienne ;

Classe 1 : moins de 20 % d'aiguilles brunies ou rougies ;

Classe 2 : 21-50 % d'aiguilles rougies ou brunies ;

Classe 3 : 51-90 % d'aiguilles rougies ou brunies, bourgeon terminal mort ;

Classe 4 : bourgeon terminal mort, la plus grande partie de la tige principale et quelques branches latérales mortes, quelques branches latérales ou aiguilles vivantes ;

Classe 5 : partie aérienne complètement morte, pas de tissus vivants.

1.11 Analyses statistiques

Dans chacune des analyses de variance, l'hypothèse de normalité des erreurs a été validée à l'aide du test de Shapiro-Wilk (Shapiro et Wilk 1965) en appliquant la procédure univariée du logiciel SAS. Dans le cas des variables morphologiques, du statut nutritionnel du substrat et des semis, on a mené une analyse de la variance (*split-plot* avec date). La comparaison des moyennes entre les deux régies d'irrigation a été effectuée en utilisant le test de Student tout en respectant les postulats de base de la procédure TTEST du logiciel *SAS*. L'effet des régies d'irrigation sur la variable « somme des longueurs des racines» (classes des racines) a été testé au moyen du test non paramétrique de Kolmogorov-Smirnov (Lehmann et d'Abrera 1975).

En ce qui concerne les variables de tolérance au gel, les blocs ont été considérés à effets aléatoires alors que les facteurs « régie d'irrigation » et « traitement de congélation » sont considérés à effets fixes. Par la suite, on applique le test de comparaisons multiples des moyennes selon la méthode de Tukey au seuil de signification de 5 %.

Chapitre deux

Résultats

2.1 Variables environnementales

L'évolution des variables environnementales enregistrées sous tunnel durant la saison de croissance (juillet à octobre 1996) des plants est présentée à la Figure 3. Lors de la période de croissance active (juillet – début septembre), les températures moyennes de l'air, du substrat et au ras des plants ont varié de 15 °C à 28 °C avec des températures du substrat légèrement supérieures de la mi-juillet jusqu'à la fin d'août (Figure 3a). Vers la fin du mois de septembre, les moyennes de ces trois températures ont progressivement diminué de 14 °C à 1 °C.

Quant à l'humidité relative dans le tunnel (Figure 3b), elle a été généralement supérieure à 70 % tout au long de la période d'enregistrement (juillet–octobre). En effet, la moyenne de cette variable a atteint respectivement 85,2 %, 82,5 %, 87,2 % et 91,8 % aux mois de juillet, août, septembre et octobre.

2.2 Teneurs en eau et quantités d'eau utilisées

Les teneurs en eau visées (25 et 40 %, v/v) se sont maintenues constantes durant la saison de croissance sans chevauchement des écarts types entre les deux régies (Figure 4). Le réajustement des teneurs en eau trois fois par semaine assure un maintien précis des régies d'irrigation. Les valeurs de teneurs en eau évaluées par le *MP-917* sont très stables et reproductibles. De plus, l'utilisation de sondes permanentes a permis la prise rapide de mesures des teneurs en eau. Les mesures de teneurs en eau réalisées avant et après chaque irrigation révèlent que les sondes conçues pour les récipients à parois ajourées sont très sensibles. Un délai de 30 minutes après l'irrigation s'avère suffisant pour détecter le changement de teneur en eau dans le substrat de croissance. L'utilisation de la rampe d'arrosage motorisée a permis d'assurer le maintien et l'homogénéité des teneurs cibles en eau dans les récipients à parois ajourées soumis à chacune des deux régies d'irrigation. Le dessèchement rapide des cavités des récipients situés en bordure est relativement bien contrôlé par des irrigations d'appoint. Les quantités d'eau cumulatives appliquées durant la saison de croissance (période du 15 juillet au 11 octobre 1996) sont de 38,2 mm et 43,0 mm respectivement pour les régies 25 % et 40 % (Figure 5).

2.3 Variables morphologiques

L'écart de 15 % maintenu entre les deux régies tout le long de la saison de croissance n'a pas eu d'effet significatif sur les variables morphologiques (hauteur, diamètre au collet et masses sèches des racines et de la partie aérienne) et l'architecture des racines vers la fin de la première saison de culture (Tableau 1).

Après une deuxième saison de croissance dans les conditions de culture de la production régulière à l'extérieur, l'évaluation des principales variables morphologiques (hauteur, diamètre au collet et masses sèches des racines et de la partie aérienne) ne révèle aucune différence significative entre les deux régies d'irrigation ; les plants d'épinette blanche (2+0) ont atteint à cette période des standards morphologiques adéquats (Tableau 1).

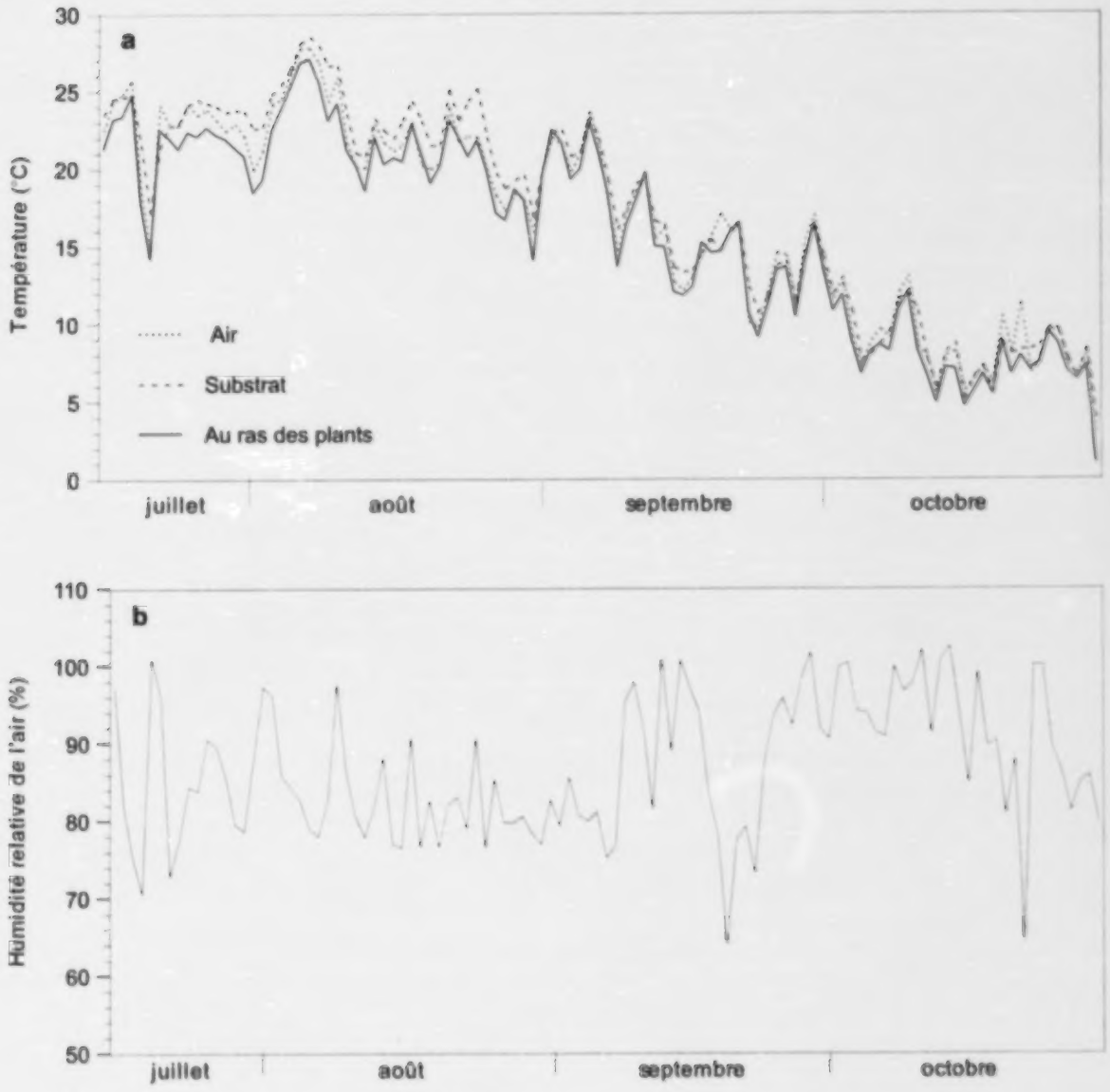


Figure 3. Évolution des températures moyennes (air, substrat et au ras des plants) (a) et de l'humidité relative moyenne (b) dans le tunnel pendant la saison de croissance des semis d'épinette blanche (1+0) produits dans des récipients à parois ajourées (*25-350A*).

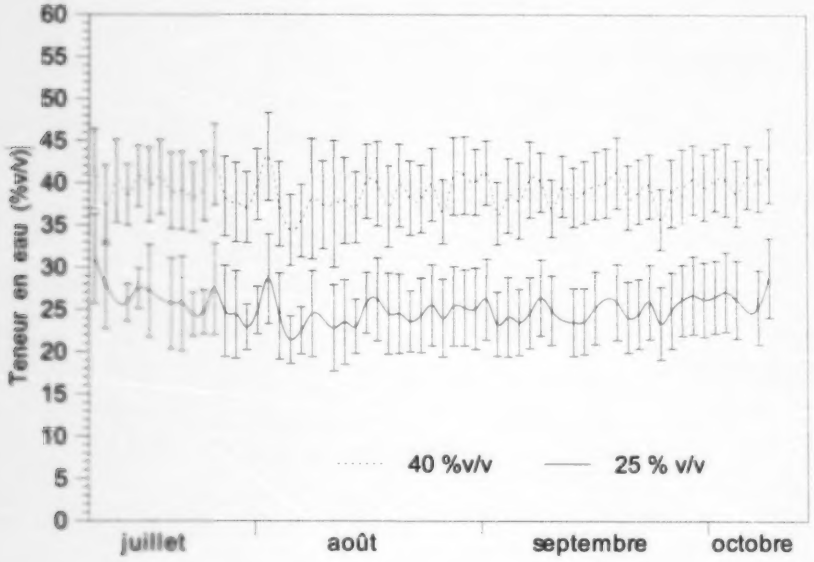


Figure 4. Évolution des teneurs en eau moyennes dans le substrat (tourbe/vermiculite) soumis à deux régies d'irrigation (25 % et 40 %, v/v) durant la saison de croissance des semis d'épinette blanche (1+0) (*Picea glauca*) produits dans des récipients à parois ajourées (*25-350A*) à la pépinière de Grandes-Piles en 1996. Les barres verticales indiquent les écarts types relatifs à chaque moyenne (n = 6).

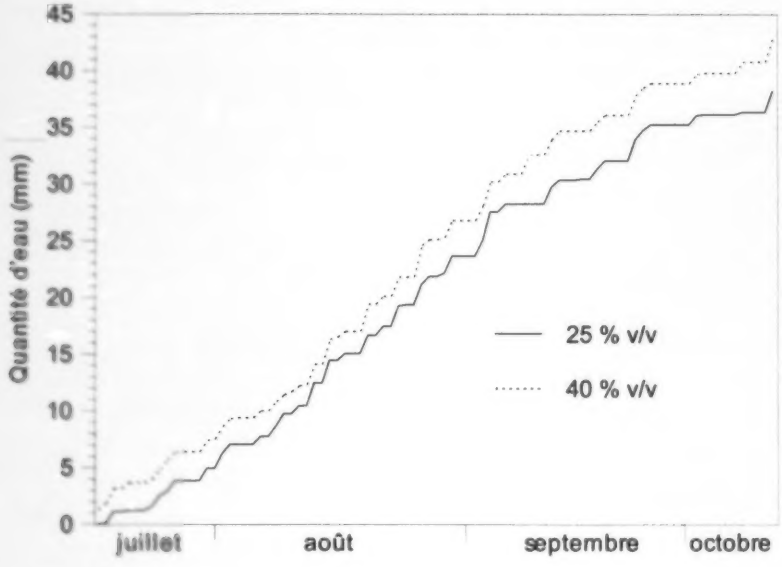


Figure 5. Quantité cumulative d'eau (mm) utilisée pour maintenir les teneurs cibles (25 % et 40 %, v/v) en eau dans le substrat (tourbe/vermiculite) durant la saison de croissance de semis d'épinette blanche (1+0) (*Picea gauca*) produits dans les récipients à parois ajourées (*25-350A*).

Tableau 1. Variables morphologiques (moyenne ± écart type) des semis d'épinette blanche soumis à deux régies d'irrigation (25 % et 40 %, v/v) en (1+0), évaluées à la fin des deux saisons de croissance

Variables	Régies d'irrigation (v/v)	
	25 %	40 %
	Épinette blanche (1+0), n = 90	
Première saison de croissance : 1996		
Hauteur (cm)	7,7 ± 1,7 a*	8,1 ± 1,6 a
Diamètre au collet (mm)	1,85 ± 0,26 a	1,90 ± 0,31a
Masse sèche de la partie aérienne (mg)	485 ± 100 a	519 ± 93 a
Masse sèche des racines (mg)	190 ± 28 a	196 ± 31 a
Longueur totale des racines (cm)	396.00 ± 125,53 a	368,05 ± 103,15 a
Surface des racines (cm^2)	53,53 ± 14,29 a	56,13 ± 16,96 a
Diamètre moyen des racines (cm)	0,047 ± 0,004 a	0,045 ± 0,004 a
	Épinette blanche (2+0)**, n = 150	
Deuxième saison de croissance : 1997		
Hauteur (cm)	36,2 ± 7,4 a	32,5 ± 6,8 a
Diamètre au collet (mm)	6,39 ± 0,96 a	6,51 ± 1,02 a
Masse sèche de la partie aérienne (mg)	7526 ± 2262 a	6573 ± 2176 a
Masse sèche des racines (mg)	2085 ± 711 a	2428 ± 809 a

* Pour chaque variable, les chiffres suivis de lettres différentes présentent des différences significatives ($p = 0,05$) entre les deux régies d'irrigation selon le test de Student.

** Les semis d'épinette blanche (2+0) ont été soumis aux régies de culture de la production régulière de la pépinière de Grandes-Piles à l'extérieur des tunnels, sans contrôle de la régie d'irrigation.

2.4 Statut nutritionnel des plants

Le maintien de deux régies d'irrigation distinctes durant la saison de culture a affecté de façon différente la variation des concentrations des éléments nutritifs dans les racines et dans les parties aériennes des semis d'épinette blanche (1+0) (Tableau 2).

Pour l'azote, les différences significatives de concentrations dans les parties aériennes entre les deux régies d'irrigation ont été observées dès le troisième échantillonnage de la première saison de croissance (D3, D4 et D5) alors que les différences pour les racines ont été détectées aux dates D1, D3 et D5. Pour toutes les concentrations en azote de ces dates, sauf pour celle dans les tissus des racines à la première date (D1), les semis soumis à la régie d'irrigation 25 % montrent des concentrations significativement plus élevées que celles de la régie 40 %. À l'inverse de cette dernière, il semble généralement qu'au cours de la saison de culture, la régie d'irrigation 25 % permet d'obtenir une plus grande concentration en azote aussi bien dans les racines que dans la partie aérienne des semis d'épinette blanche (1+0).

Pour le phosphore, des différences significatives de concentrations ont été respectivement observées à la fin (D5) et au milieu (D2) de la saison de culture dans les parties aériennes et les racines. Pour ces deux dates, les plants produits sous la régie d'irrigation 40 % montrent des concentrations plus élevées que celles de la régie d'irrigation 25 %.

Pour le potassium, l'application de calendriers d'irrigation distincts a un effet significatif sur les concentrations en potassium de la partie aérienne en fin de saison de culture (D4 et D5) et des racines au milieu et à la fin de la saison de culture (D2, D4 et D5). Pour toutes ces dates, on note que la régie d'irrigation 40 % permet d'obtenir une plus grande concentration en potassium dans les tissus.

Tableau 2. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur les concentrations des éléments nutritifs dans les parties aériennes et des racines des semis de *Picea glauca* (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées

	Concentrations des éléments nutritifs dans les parties aériennes (mg/Kg)									
	N		P		K		Ca		Mg	
Régies d'irrigation / **Dates**	**25 %**	**40 %**	**25 %**	**40 %**	**25 %**	**40 %**	**25 %**	**40 %**	**25 %**	**40 %**
96.07.29 (D1)	25,3a*	25,3a	3,67a	3,65a	13,33a	13,50a	1,18a	1,18a	1,50a	1,46a
96.08.19 (D2)	24,6a	24,0a	3,64a	3,66a	12,00a	12,17a	1,23a	1,27a	1,49a	1,42a
96.09.03 (D3)	25,2a	23,0b	3,59a	3,58a	12,17a	12,33a	1,48a	1,58a	1,64a	1,58a
96.09.16 (D4)	26,6a	25,7b	3,76a	3,89a	11,50b	12,67a	1,84a	1,79a	1,84a	1,85a
96.10.21 (D5)	25,6a	23,2b	3,28b	3,51a	8,17b	11,10a	1,62b	1,89a	1,66a	1,69a
	Concentrations des éléments nutritifs dans les racines (mg/Kg)									
96.07.29 (D1)	28,6b	30,5a	6,11a	6,86a	11,33a	12,17a	3,13a	2,96a	1,55a	1,64a
96.08.19 (D2)	29,6a	29,1a	6,31b	7,09a	11,67b	12,50a	2,77a	2,69a	1,81a	1,66a
96.09.03 (D3)	29,9a	27,7b	6,13a	6,05a	11,83a	11,67a	1,94a	1,76a	1,64a	1,67a
96.09.16 (D4)	29,6a	29,7a	6,02a	6,30a	11,00b	12,17a	2,02a	1,88b	1,64a	1,73a
96.10.21 (D5)	27,6a	25,2b	4,18a	4,26a	6,83b	7,95a	2,61a	2,54a	1,62b	1,81a

* Pour un même élément nutritif, les concentrations moyennes (n = 6 échantillons composites, chaque échantillon composite est constitué de 15 semis) suivies de lettr différentes horizontalement présentent des différences significatives entre les deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) selon le test de Student au seuil de 5 %.

Tableau 3. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur la fertilité du substrat et la conductivité électrique lors de la production des semis de *Picea glauca* (1+0) dans des récipients à parois ajourées

	Fertilité du substrat en éléments nutritifs (mg/Kg)								Conductivité électrique	
	NH_4		NO_3		P		K		µS/cm	
Régies d'irrigation **Dates**	**25 %**	**40 %**	**25 %**	**40 %**	**25 %**	**40 %**	**25 %**	**40 %**	**25 %**	**40 %**
96.07.29 (D1)	111,0a*	115,1a	253,3a	240,0a	142,33a	153,33a	204,00a	195,67a	1792a	1732a
96.08.19 (D2)	219,8a	216,8a	523,3a	492,8a	276,33a	273,17a	332,33a	322,83a	3027a	2798a
96.09.03 (D3)	308,7a	255,2b	616,7a	524, 0b	355,83a	295,67b	485,83a	415,83b	3293a	3045a
96.09.16 (D4)	250,8a	192,8b	543,3a	459,5b	379,50a	296,67b	440,83a	362,17b	3340a	2885b
96.10.21 (D5)	176,0a	112,6b	476,3a	312,8b	395,83a	279,83b	431,83a	323,83b	2730a	2162b

* Pour un même élément nutritif, les concentrations moyennes (n = 6 échantillons composites, chaque échantillon composite est constitué du mélange du substrat iss 15 cavités) suivies de lettres différentes horizontalement présentent des différences significatives entre les deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) selon le test de St. au seuil de 5 %.

Pour le calcium, la régie d'irrigation n'a eu d'effet significatif que vers la fin de la saison de croissance aussi bien dans les racines (D4) que dans la partie aérienne (D5) alors que pour le magnésium, cette différence entre les régies d'irrigation 25 % et 40 % n'est observée qu'au niveau des racines à la fin de la saison de croissance (D5) (Tableau 2).

2.5 Fertilité du substrat

La régie d'irrigation a affecté la concentration du substrat en azote (NH_4 et NO_3), en potassium et en phosphore aux dates D3, D4 et D5 (Tableau 3). Pour ces trois dates, la régie d'irrigation 25 % a favorisé le maintien d'une fertilité supérieure du substrat en NH_4, NO_3, K et P. Vers la fin de la saison de croissance (D4 et D5), la régie d'irrigation a eu un effet significatif sur la salinité du substrat exprimée en terme de conductivité électrique. Le maintien d'une régie d'irrigation plus faible en eau (25 % v/v) a engendré une accumulation de sels significativement supérieure vers la fin de saison de croissance (Tableau 3). L'écart d'accumulation entre les substrats soumis aux deux régies d'irrigation atteint, en moyenne, 500 µS/cm en fin de saison de croissance (D4 et D5).

2.6 Tolérance au gel

2.6.1 Pertes en eau des racines

Les résultats de l'analyse de variance indiquent que, pour toutes les dates d'échantillonnage combinées, la régie d'irrigation n'a aucun effet sur la tolérance au gel mesurée par le pourcentage de perte en eau des racines. Par contre, à chaque date d'échantillonnage, ces pertes sont significativement influencées par l'effet « température de congélation» ($P < 0,0001$). La comparaison des moyennes n'a pas révélé la présence de différences significatives entre les deux régies d'irrigation quant à leur effet sur les pertes en eau des racines aux différentes dates d'échantillonnage (Tableau 4). Toutefois, la régie d'irrigation 25 % a engendré des pertes en eau sensiblement inférieures à celles de la régie 40 % (Tableau 4). L'interaction entre les facteurs « régie d'irrigation » et « traitement de congélation » n'est significative que lors des deux dernières dates d'échantillonnage D4 ($P = 0,0236$) et D5 ($P = 0,0352$) du mois de novembre.

Pour toutes les dates d'échantillonnage, le traitement de congélation a un effet significatif sur les pertes en eau ($P < 0,0001$). Ainsi, le test de Tukey indique que les pourcentages de pertes en eau des plants ayant reçu les traitements de congélation T_2 et T_3 sont significativement supérieurs à ceux du traitement témoin pour les dates d'échantillonnage D1 et D2 (Tableau 4). Pour ces dates, le traitement de congélation T_3 a produit un pourcentage de pertes en eau significativement plus élevé que celui du traitement T_2. Les pourcentages de pertes en eau des plants soumis aux traitements de congélation T_3 et T_4 à la date d'échantillonnage D3 sont significativement supérieurs à celui du traitement témoin. Aux dates d'échantillonnage D4 et D5, les pourcentages de pertes en eau des plants de la régie 40 % soumis aux traitements de congélation T_3 et T_4 sont significativement supérieurs à celui du traitement témoin (Tableau 4). Les pertes en eau des racines soumises à des gels sévères ne sont devenues faibles qu'à partir du début du mois de novembre. À la dernière date d'échantillonnage D5, les pertes en eau des racines sont similaires entre les quatre traitements de congélation, ce qui indique que les racines sont bien endurcies.

2.6.2 Capacité de croissance des racines

Quelle que soit la date d'échantillonnage, à l'exception de la date d'échantillonnage D1, la régie d'irrigation n'a aucun effet significatif sur l'apparition de nouvelles racines chez les semis soumis aux différents traitements de congélation. La comparaison des moyennes pour les quatre dernières dates d'échantillonnage ne montre pas d'effets significatifs des deux régies d'irrigation sur la capacité de croissance des racines en réaction aux différentes températures de gel (Tableau 5). L'interaction régie d'irrigation x température de congélation est significative à la première date d'échantillonnage D1. Ainsi, selon le test de Tukey au seuil de 5 % à cette première date d'échantillonnage, les plants soumis à la régie d'irrigation 40 % et ayant reçu les traitements de congélation T ont un nombre de racines significativement inférieur à celui des plants du traitement témoin alors que cette différence existe mais de façon non significative sous la régie d'irrigation 25 %.

Pour toutes les dates d'échantillonnage, la formation de nouvelles racines est significativement influencée par l'effet température de congélation ($P < 0,0001$). Étant donné l'absence de différences significatives entre les deux régies d'irrigation durant toute la saison de croissance, les comparaisons de moyennes sont effectuées entre les traitements de congélation par date d'échantillonnage (Tableau 5). Ainsi, pour la deuxième date d'échantillonnage D2, les plants ayant reçu les traitements de congélation T_2 et T_3 présentent un nombre de racines significativement inférieur à celui des plants témoins (T_0) alors que pour la date D3, ce sont les traitements

Tableau 4. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur le pourcentage de perte en eau des racines des semis d'épinette blanche (1+0) produits dans le récipient à parois ajourées *25-350A*

Date	Régie d'irrigation (%, v/v)	Moyenne (%)	Température de congélation **				
			T_0 (0 °C) (%)	T_1 (-4 °C) (%)	T_2 (-8 °C) (%)	T_3 (-12 °C) (%)	T_4 (-20 °C) (%)
96.09.23 (D1)	25	11,24 a*					
	40	14,27 a	6,03 c	5,83 c	17,22 b	21,95 a	-
96.10.07 (D2)	25	5,43 a					
	40	5,82 a	3,75 c	3,73 c	5,44 b	9,75 a	-
96.10.21 (D3)	25	4,23 a					
	40	4,30 a	2,10 c	-	3,14 c	4,94 b	6,89 a
96.11.04 (D4)	25	2,81a	1,83 bc	-	2,96 ab	2,80 ab	3,65 a
	40	3,92a	1,94 c	-	2,87 bc	4,58 ab	6,27 a
96.11.18 (D5)	25	3,54 a	2,89 a	-	3,97 a	3,26 a	4,03 a
	40	3,74 a	2,86 b	-	3,19 ab	4,58 a	4,32 a

* Pour chaque date d'échantillonnage, les moyennes de pourcentage de perte en eau suivies de lettres différentes présentent des différences significatives entre les deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) selon le test de Student au seuil de 5 %. ** Lorsque l'interaction régie d'irrigation x traitement de congélation n'est pas significative (D1, D2 et D3), les différences entre les moyennes sont testées entre les niveaux de congélation indépendamment des régies d'irrigation en utilisant le test de Tukey à P = 0,05. Par contre, lorsque cette interaction est significative (D4 et D5), les comparaisons entre les moyennes ont été effectuées entre les traitements de congélation pour chaque régie d'irrigation. – Le traitement de congélation (-20 °C) non effectué lors des dates D2 et D3 car les racines des semis n'étaient pas encore bien endurcies alors que celui de -4 °C a été éliminé à cause de l'absence de différences significatives avec le traitement témoin (0 °C). Le traitement T_1 (-4 °C) a été remplacé par le traitement de congélation -20 °C lors des trois dernières dates afin de tenir compte du niveau supérieur d'endurcissement des plants à ces dates.

Tableau 5. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur la capacité de croissance des racines des semis d'épinette blanche (1+0) en réaction à différentes températures de congélation

Date	Régie d'irrigation (%, v/v)	Moyenne (nombre de nouvelles racines blanches ≥ 1 cm)	Température de congélation **				
			T_0 (0 °C)	T_1 (-4 °C)	T_2 (-8 °C)	T_3 (-12 °C)	T_4 (-20 °C)
			(nombre de nouvelles racines blanches ≥ 1 cm)				
96.09.23 (D1)	25	15,4 a*	35,9 a	25,6 a	0,0 b	0,0 b	-
	40	10,5 b	28,1 a	14,1 b	0,0 c	0,0 c	-
96.10.07 (D2)	25	10,3 a					
	40	8,9 a	18,6 a	19,4 a	0,4 b	0,0 c	-
96.10.21 (D3)	25	9,8 a					
	40	7,8 a	20,3 a	-	12,6 a	2,3 b	0,0 c
96.11.04 (D4)	25	12,3 a					
	40	12,4 a	20,6 a	-	14,8 a	12,7 a	1,1 b
96.11.18 (D5)	25	17,0 a					
	40	18,8 a	19,1 a	-	21,5 a	19,1 a	11,2 b

* Pour chaque date d'échantillonnage, les moyennes exprimant le nombre de nouvelles racines suivies de lettres différentes présentent des différences significatives entre les deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) selon le test de Student au seuil de 5 %.

** Lorsque l'interaction régie d'irrigation x traitement de congélation n'est pas significative (D2, D3, D4 et D5), les différences entre les moyennes sont calculées entre les niveaux de congélation indépendamment des régies d'irrigation en utilisant le test de Tukey à $p = 0,05$.

\- Traitements de congélation non effectués.

de congélation T_3 et T_4 qui indiquent un nombre de racines significativement inférieur à celui des semis témoins. Vers la fin de la saison de croissance (D4 et D5), seul le traitement T_4 se distingue significativement des autres traitements.

Afin de mettre en relation le nombre de racines nouvellement formées en réaction aux différentes températures de gel et le pourcentage de pertes en eau, une régression curviligne de type exponentielle décroissante a été ajustée entre ces deux variables. Lorsqu'on effectue cette régression sans tenir compte des traitements, il s'avère que la fonction exponentielle décroissante ajuste d'une façon significative la relation existant entre le pourcentage de pertes en eau et le nombre de racines (Figure 6). Cependant, lorsqu'on effectue les régressions par traitement, on n'observe aucune relation significative entre le nombre de racines et le pourcentage de pertes en eau, peu importe la date d'échantillonnage. Il semble donc que la relation entre le nombre de racines et le pourcentage de pertes en eau est due uniquement aux traitements de congélation.

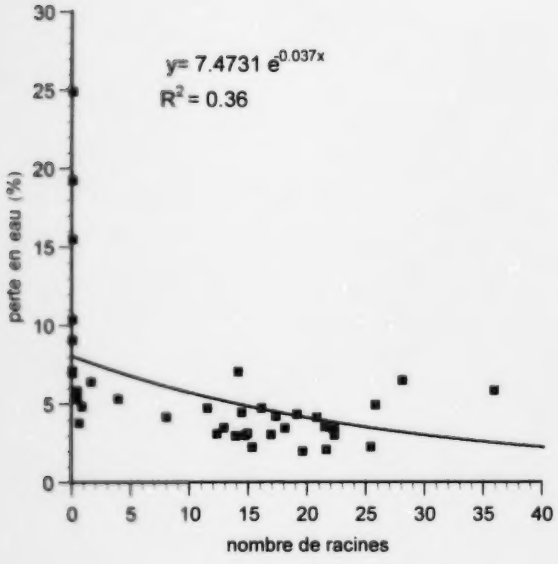


Figure 6. Relation curviligne entre les pertes en eau des racines et le nombre de nouvelles racines blanches formées lors du test de capacité de croissance racinaire. Chaque coordonnée (x, y) correspond à la moyenne de 16 et 12 plants respectivement.

2.6.3 Libération des électrolytes par les apex de la partie aérienne

La libération des électrolytes n'est influencée significativement par la régie d'irrigation que pour les dates d'échantillonnage D2 (P = 0,02) et D4 (P = 0,05) alors que les effets significatifs de congélation ont été observés lors des trois premières dates d'échantillonnage D1, D2 et D3 (P < 0,0001). À la date D2, la libération des électrolytes de la partie aérienne des semis soumis à la régie d'irrigation 40 % est significativement inférieure à celle de la régie d'irrigation 25 % (Tableau 6). À la date D4 par contre, la régie d'irrigation 40 % a montré une conductivité électrolytique significativement supérieure à celle de la régie d'irrigation 25 %. Pour les autres dates, on n'observe pas de différence significative entre les deux régies d'irrigation. L'interaction entre les facteurs régie d'irrigation et traitement de congélation n'est pas significative pour toutes les dates d'échantillonnage.

Lorsqu'on compare les traitements de congélation indépendamment des régies d'irrigation, à la première date d'échantillonnage, la libération des électrolytes diffère significativement entre les températures de congélation (Tableau 6). En effet, le traitement T_3 (-12 °C) a engendré la plus grande libération d'électrolytes, suivi en ordre décroissant des traitements T_2 (-8 °C), T_1 (-4 °C) et T_0 (témoin). Pour la date d'échantillonnage D2, les traitements T_3 et T_2 ont une libération d'électrolytes significativement supérieure à celle du traitement témoin et la température de congélation T_3 produit une libération d'électrolytes plus élevée que le traitement T_2. Pour la date D3, ce sont les traitements T_4 et T_3 qui montrent une libération d'électrolytes significativement supérieure à celle du témoin (Tableau 6). Toutefois, la libération des électrolytes du traitement T_4 est significativement supérieure à celle du traitement T_3. Vers la fin de la saison de croissance (D4 et D5), la libération des électrolytes est similaire entre les températures de congélation.

Lors de la première date d'échantillonnage, les semis des deux régies d'irrigation (25 et 40 %) ayant subi un gel de -12 °C montrent un indice de dommages (I_i) très élevé (>10) (résultats non présentés). À partir de la fin du mois d'octobre, cet indice est faible (I_i < 1), ce qui indique que les parties aériennes des deux régies d'irrigation tolèrent mieux les températures évaluées (T_1, T_2, T_3 et T_4).

Tableau 6. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur la libération des électrolytes des parties aériennes des semis d'épinette blanche (1+0) en réaction à différents traitements de gel

Date	Régie d'irrigation (%, v/v)	Conductivité électrolytique moyenne (µS/cm)	Température de congélation **				
			T_0 (0 °C)	T_1 (-4 °C)	T_2 (-8 °C)	T_3 (-12 °C)	T_4 (-20 °C)
			(µS/cm)				
96.09.23 (D1)	25	6,04 a*					
	40	5,39 a	1,94 d	2,71 c	4,90 b	13,31 a	-
96.10.07 (D2)	25	2,57 a					
	40	2,05 b	1,65 c	1,77 c	2,08 b	3,73 a	-
96.10.21 (D3)	25	2,01 a					
	40	1,83 a	1,65 c	-	1,77 bc	2,08 b	3,73 a
96.11.04 (D4)	25	1,73 b					
	40	1,91 a	1,87 a	-	1,75 a	1,79 a	1,87 a
96.11.18 (D5)	25	1,65 a					
	40	1,66 a	1,79 a	-	1,63 a	1,63 a	1,57 a

* Pour chaque date d'échantillonnage, les moyennes de la conductivité électrolytique suivies de lettres différentes présentent des différences significatives entre les deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) selon le test de Student au seuil de 5 %.

** Lorsque l'interaction régie d'irrigation x traitement de congélation n'est pas significative (D1, D2, D3, D4 et D5), les différences entre les moyennes sont calculées entre les niveaux de congélation indépendamment des régies d'irrigation en utilisant le test de Tukey à P = 0,05.

\- Traitements de congélation non effectués.

2.6.4 Teneur en eau

De façon générale, les teneurs en eau de la partie aérienne et des racines des semis de la régie d'irrigation 25 % sont légèrement supérieures à celles de la régie 40 % (Tableau 7). L'application de régies d'irrigation différentes n'a aucun effet significatif sur la teneur en eau (rapport masse sèche/masse fraîche) de la partie aérienne ; pour celui des racines, on note un effet significatif aux dates d'échantillonnages D1 (P = 0,10) et D2 (P = 0,05). Lors de l'endurcissement, la teneur en eau augmente graduellement dans les racines et les tiges, ce qui indique une diminution du contenu en eau. Cette baisse est relativement plus élevée dans les racines que dans la partie aérienne. Lorsque la teneur en eau atteint 35 % en novembre, la partie aérienne des plants est peu affectée par des températures de congélation très basses (-20 °C) (Tableau 4). À une teneur en eau des racines de 27 %, atteinte vers la mi-novembre, la capacité de croissance des racines mesurée à la fin de la saison a pu être maintenue à la suite d'un gel des racines à −12 °C (Tableau 5).

2.6.5 Qualification visuelle des dommages de la partie aérienne (Indice de Jian)

Les dommages occasionnés à la partie aérienne sont relativement semblables entre les deux régies d'irrigation, mais varient en fonction du traitement de congélation (Annexe 2). Lors des deux premières dates d'échantillonnage, la presque totalité des plants soumis aux traitements de congélation T_0 et T_1 n'ont presque pas eu de dommages (indice 0), comparativement aux températures T_2 et T_3. En fonction de la progression de l'endurcissement des plants au cours de l'automne, les différences entre tous les traitements de congélation s'estompent vers la mi-novembre.

Tableau 7. Comparaison des moyennes de l'effet de deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) maintenues constantes durant la saison de croissance, sur la teneur en eau de la partie aérienne et des racines des semis de *Picea glauca* (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées

Date	Teneur en eau (masse sèche/masse fraîche)			
	Partie aérienne		Racines	
	Régie d'irrigation : 25 %	Régie d'irrigation : 40 %	Régie d'irrigation : 25 %	Régie d'irrigation : 40 %
96.09.23 (D1)	26,85 a*	26,18 a	16,33 a	15,36 b
96.10.07 (D2)	30,87 a	30,50 a	19,71 a	16,58 b
96.11.04 (D4)	36,69 a	36,47 a	24,17 a	22,18 a
96.11.18 (D5)	35,66 a	35,15 a	26,68 a	27,91 a

Horizontalement, des teneurs en eau suivies de lettres différentes présentent des différences significatives entre les deux régies d'irrigation (25 et 40 %, v/v) selon le test de Student au seuil de 5 %.

Chapitre trois

Discussion

L'utilisation du *MP-917* muni de sondes à deux diodes a permis un contrôle précis des régies d'irrigation cibles (25 % et 40 %, v/v) dans les substrats tourbeux tout au long de la première saison de croissance (Figure 4). En effet, la rapidité, la simplicité, la fiabilité, la reproductibilité et la précision des mesures font du *MP-917* un outil de gestion de l'irrigation en pépinière très attrayant malgré un investissement initial élevé (8 k$). Sur le plan opérationnel, l'insertion de sondes permanentes dans les récipients à parois ajourées (*25-350A*) rend la gestion de l'irrigation à l'aide du *MP-917* très facile, économique et protectrice de l'environnement. Le nombre minimal de sondes à installer est intimement lié à l'erreur tolérable fixée par le pépiniériste et au système d'irrigation utilisé. Ce dernier affecte particulièrement la variabilité spatiale des teneurs en eau entre les récipients. Le *MP-917* est utilisé actuellement sur une base opérationnelle dans trois pépinières du Fonds forestier du Québec (Sainte-Luce, Berthier et Grandes-Piles) pour gérer les productions à racines nues ou en récipient aussi bien sous tunnel qu'à l'extérieur.

Le maintien de deux régies d'irrigation constantes (25 % et 40 %, v/v) durant la saison de croissance n'a pas affecté significativement la morphologie, l'architecture des racines (nombre, longueur et diamètre) et les variables de tolérance au gel (perte en eau, libération des électrolytes, capacité de croissance des racines et teneur en eau de la partie aérienne) des semis d'épinette blanche (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées. Après une deuxième saison de croissance à l'extérieur des tunnels, sous la régie de culture régulière de la pépinière de Grandes-Piles, l'évaluation des variables morphologiques ne révèle pas de différence significative en 2+0 entre les deux régies quant à leur effet sur les variables morphologiques des semis (hauteur, diamètre, masse des racines et de la partie aérienne, architecture des racines). Nos résultats démontrent que le maintien d'une régie d'irrigation variant entre 25 et 40 % durant la saison de croissance est adéquat et permet au producteur d'atteindre les standards de croissance souhaités par le MRN. Par contre, il reste à déterminer le seuil minimal de teneur en eau en dessous duquel la croissance et la physiologie des semis d'épinette blanche (1+0) sont significativement affectées. En utilisant un substrat qui facilite le drainage (tourbe-vermiculite-perlite), Khan *et al.* (1996) ont évalué différentes teneurs en eau gravimétriques variant de 7 à 65 % et ont trouvé que des teneurs en eau modérées (29 –53 %) permettent d'optimiser la croissance et la physiologie des semis du douglas (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). Par contre, pour d'autres espèces ligneuses comme le pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.) ou le *Prunus* sp., les variables de croissance ne sont significatives que lorsque les teneurs en eau sont élevées (Timmer et Miller 1991, Hipps *et al.* 1994). Les résultats de ces travaux laissent présager que l'optimisation des régies d'irrigation est influencée par les propriétés physiques du substrat, l'essence et les conditions environnementales. Bernier (1992) a montré des différences prononcées en terme de disponibilité en eau entre des substrats sableux et tourbeux, et même entre des tourbes « brunes » et « blondes » utilisées par la majorité des pépinières au Québec (Bernier et Gonzalez 1995, Bernier *et al.* 1995). Ces deux types de tourbe se caractérisent généralement par des degrés d'humification différents qui génèrent différentes substances chimiques, y compris les acides fulviques et humiques (Heiskanen 1995).

Ces substances ont un effet direct sur la croissance ou, à travers leur effet, sur la capacité de rétention de l'eau et des éléments nutritifs (Argo 1998a, Puustjärvi 1976, Schnitzer 1986).

En plus de la disponibilité de l'eau, la croissance des semis et plus particulièrement celle des racines est particulièrement affectée par le contenu volumique en oxygène dans la rhizosphère. Dans des conditions d'irrigation excessive, l'aération devient un des facteurs qui limitent la croissance des racines. Argo (1998b) et Heiskanen (1993a, b) considèrent que le maintien d'un contenu volumique en air de 20 à 40 % dans le substrat de croissance est nécessaire et est un préalable à la croissance des semis. L'absence de différence significative entre les deux régies d'irrigation (25 % et 40 %) quant à leur effet sur l'architecture des racines (longueur totale, diamètre et surface des racines) laisse suggérer que la diminution de la teneur en eau à 25 % (v/v) n'a pas induit de modifications majeures à l'environnement de la rhizosphère. Timmer et Miller (1991) ont évalué trois régimes hydriques déterminés en fonction du poids des récipients à saturation (humide : 90 %, mésique : 72 % et sec : 55 %) et ont observé que, contrairement au régime humide, les régimes mésique et sec ont favorisé une bonne extension et une fibrosité accrue des racines.

L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation entraînera une diminution substantielle de la quantité d'eau utilisée, du ruissellement et des pertes en éléments nutritifs par lessivage. Tyler *et al.* (1996) ont montré que l'optimisation de la régie d'irrigation basée sur le principe de la diminution de la fraction lessivée a limité le lessivage des nitrates, de l'ammonium et du phosphore de 66, 62 et 57 % respectivement. Les résultats des travaux de Groves *et al.* (1998) révèlent que 90 % du maximum de la croissance des plants est atteint avec une réduction de 40 % en volume de la régie d'irrigation. Pour optimiser l'absorption des éléments nutritifs et diminuer leur perte par lessivage, un contrôle de la fertilité du substrat couplé à une régie d'irrigation rigoureuse tout au long de la saison de croissance s'avère nécessaire. À la lumière des résultats obtenus en tunnel (Tableau 3), le maintien d'une régie d'irrigation de 40 % semble entraîner un lessivage des éléments nutritifs relativement important en comparaison avec la régie d'irrigation de 25 %. En effet, les concentrations en azote (NH_4 et NO_3), phosphore, et potassium mesurées dans le substrat de la régie d'irrigation 25 % sont significativement plus élevées que celles de la régie 40 % pour les trois dernières récoltes de la saison de culture. Le maintien d'une fertilité et d'une conductivité électrique relativement élevées pourraient avoir des effets indirects sur la disponibilité des éléments nutritifs et la croissance des plants (Landis *et al.* 1989). Comme les teneurs en eau généralement maintenues dans les productions de plants en récipient à parois ajourées sont souvent supérieures à celles qu'on a évaluées au cours de cette expérience, les pertes en éléments minéraux pourraient être supérieures. Le contrôle de l'irrigation dans les pépinières forestières au Québec contribuera sans doute à la diminution du lessivage des éléments minéraux et, par conséquent, de la contamination possible de la nappe phréatique par les fertilisants. Cependant, une évaluation précise des pertes d'éléments nutritifs par lessivage en fonction des régies d'irrigation sera un atout pour mieux cerner le degré de contamination associé aux programmes de fertilisation, même si ce lessivage reste faible comparativement à celui que produit le secteur agricole.

Le suivi du statut nutritionnel des semis d'épinette blanche (1+0) a montré que vers la fin de la saison de croissance, les concentrations en azote dans les tissus de la partie aérienne et des racines des plants soumis à la régie d'irrigation 25 % sont significativement supérieures à celles de la régie d'irrigation 40 % (Tableau 2). Malgré ces différences entre les deux régies, les concentrations en azote déterminées dans la partie aérienne restent relativement élevées (2,3 – 2,7 %). Cependant, les concentrations en potassium, phosphore, calcium et magnésium dans les tissus de la partie aérienne et des racines de la régie 40 % sont généralement soit égales, soit significativement plus élevées que celles de la régie 25 %.

Bigras *et al.* (1996) ont montré que les parties aériennes des semis d'épinette noire ayant une concentration de 1,28 % N ont un meilleur endurcissement et tolèrent mieux le gel par comparaison aux concentrations de 0,64 % et 0,87 % N. D'autres travaux ont démontré que la fertilisation azotée améliore la tolérance au gel des semis de *Picea glauca* (Moench) Voss (Calmé *et al.* 1993), *Pinus sylvestris* L. (Rikala et Repo 1997) et *Picea rubens* Sarg. (Dehayes *et al.* 1989). Les concentrations en azote observées aussi bien dans les racines que dans la partie aérienne (Tableau 2) ont certainement favorisé l'endurcissement et la tolérance précoces des semis aux basses températures (-12 °C et -20 °C) dès la fin du mois d'octobre. Pellet et Carter (1981) ont effectué une revue exhaustive de littérature concernant l'effet de la fertilisation sur la tolérance au gel des plants et en ont conclu qu'une fertilisation normale engendre un endurcissement supérieur des

plants par comparaison à des fertilisations excessives ou faibles. Landis *et al.* (1998) recommandent des concentrations en azote dans les feuilles variant de 2,0 à 2,5 % pour favoriser une meilleure tolérance des plants au gel.

L'application de régies d'irrigation différentes n'a pas eu un effet significatif sur le pourcentage de perte en eau des racines, la capacité de croissance des racines et la teneur en eau (rapport masse sèche/ masse fraîche) de la partie aérienne. Les pertes en eau variaient en fonction du traitement de congélation. Vers la fin du mois de septembre (D1), les pertes en eau occasionnées par le traitement T_3 (-12 °C) étaient supérieures à celles du traitement T_0 (22 contre 6) (Tableau 4). Ces pertes en eau ont diminué en fonction de l'endurcissement des plants. Ritchie (1991) a observé que généralement les racines endurcies perdent moins de 6 % d'eau alors que celles qui sont endommagées peuvent perdre plus de 7 %. Nos résultats semblent donc démontrer que l'endurcissement des racines est relativement bien avancé vers le début du mois de novembre (Tableau 4).

Pour certaines dates, des différences entre les deux régies ont été observées dans la conductivité électrolytique des parties aériennes et la teneur en eau des racines. En suivant l'évolution des teneurs en eau depuis le début de septembre jusqu'à novembre, il apparaît que la teneur en eau a augmenté graduellement, c'est-à-dire qu'il y a eu diminution du contenu en eau aussi bien dans les racines que dans les parties aériennes à cause de la lignification accentuée des tissus. Cette diminution de teneur en eau dans la partie aérienne a été observée chez l'épinette noire (Colombo 1990) et l'épinette blanche (Grossnickle 1989) et varie en fonction de l'endurcissement des semis. Elle pourrait être largement due à la diminution de la température du substrat qui a un effet direct sur la viscosité de l'eau et la conductivité hydraulique des racines (Running et Reid 1980). Ces basses températures du substrat en automne ont un effet direct sur la diminution de l'activité métabolique et la turgescence des cellules des racines en réaction à la réduction de l'absorption de l'eau (Grossnickle 1988). La diminution du contenu en eau était relativement plus élevée dans les racines que dans la partie aérienne. Lorsque la teneur en eau a atteint 35 % au mois de novembre, les températures de congélation très basses (-20 °C) n'ont causé aucun dommage visible dans la partie aérienne. Par contre, les racines n'ont pu maintenir leur capacité de croissance qu'à une température de -12 °C (Tableau 5), mais avec une teneur en eau variant de 24 à 27 % (Tableau 7). La probabilité d'atteindre des températures de -12 °C dans la rhizosphère au début du mois de novembre reste très faible dans la majorité des pépinières forestières du Québec. L'absence de différence significative entre les plants témoins et les plants qui ont subi un traitement de gel (-12 °C) quant au nombre de nouvelles racines blanches indique clairement que l'intégrité fonctionnelle des semis, y compris la photosynthèse nette, est semblable entre les deux traitements (Folk et Grossnickle 1997, Philipson 1988).

Toutes les variables utilisées comme descripteurs d'évaluation de la tolérance au gel des semis d'épinette blanche (Tableaux 4-7) révèlent que, au cours de l'endurcissement, l'acquisition de la tolérance au gel à des basses températures est plus rapide dans la partie aérienne que dans les racines. Johnston et Havis (1977) ont montré que la tolérance au gel des racines à des basses températures nécessite plus de temps et que cette tolérance a progressé de -4 °C en septembre à -23 °C vers la mi-décembre. L'endurcissement des racines des semis d'épinette blanche est intimement lié à la diminution progressive des températures dans le substrat (Bigras et d'Aoust 1992). En comparant l'endurcissement des racines de 38 espèces ligneuses, Havis (1976) a observé que les racines d'épinette blanche sont les plus endurcies et peuvent résister à des températures de -23,3 °C.

Conclusion

L'utilisation du *MP-917* a permis de contrôler avec précision les teneurs cibles en eau (25 % et 40 %, v/v) dans les cavités du récipient à parois ajourées *25-350A* tout au long de la saison de croissance. L'analyse des variables morphologiques et de l'architecture des racines des semis d'épinette blanche (1+0) produits sous tunnel n'a pas montré de différence significative entre les deux régies d'irrigation. Au cours de la deuxième saison de croissance et sous la régie de culture régulière de la pépinière de Grandes-Piles, les plants soumis aux deux régies d'irrigation ont conservé une croissance adéquate et n'ont pas montré de différence significative en termes de variables morphologiques en fin de saison. Les régies d'irrigation évaluées diffèrent significativement quant à leur effet sur la fertilité du substrat et le statut nutritionnel des plants durant la première saison de croissance. Les analyses de la fertilité du substrat révèlent que la régie d'irrigation 40 % peut entraîner une perte relativement importante d'éléments nutritifs par lessivage, qui dépasse celle qu'entraîne la régie d'irrigation 25 %. Ces résultats indiquent qu'on peut optimiser davantage la régie d'irrigation et la fertilité du substrat tout en favorisant un endurcissement adéquat des plants produits dans les récipients à parois ajourées. Contrairement aux régies d'irrigation généralement utilisées dans les pépinières (> 50 %, v/v), le contrôle de l'irrigation et l'application de régies plus faibles devraient améliorer l'aération du sol, la croissance des racines et l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs. Ce contrôle permettra aussi de diminuer la formation de mousses et le développement des agents pathogènes tout en diminuant la pollution des eaux souterraines par les nitrates. Par ailleurs, en matière de gestion de l'irrigation en pépinière forestière, on devrait s'orienter vers le maintien de teneurs dynamiques en eau qui tiennent compte de la phénologie des plants (Gingras *et al.* 1999).

La photopériode courte, les faibles températures et le stress hydrique sont des variables environnementales importantes pour induire la tolérance au gel. Ces signaux engendrent une accumulation de l'acide abscissique responsable du déclenchement de l'endurcissement (Lee et Chen 1993). Afin de mieux endurcir les plants à l'automne, on peut induire un léger stress hydrique en diminuant la teneur en eau, ce qui entraînera une entrée en dormance et conférera aux plants une certaine tolérance au gel (Landis *et al.* 1998). L'arrêt de croissance et le début de l'endurcissement précoce vers la fin de la saison de croissance chez l'épinette blanche peuvent être facilement induits en maintenant dans la rhizosphère des teneurs en eau plus faibles (15 à 20 %, v/v) (Christiansen, communication personnelle). Certaines teneurs en eau (15–30 %, v/v) favorisent la formation rapide des traits cireux épicuticulaires sur les aiguilles des semis d'épinette blanche (1+0) (Christiansen, communication personnelle). L'amélioration du développement de la cuticule à l'aide de régies de culture ne peut qu'augmenter la résistance à la dessiccation hivernale, surtout lorsque les racines sont gelées (Colombo 1997, Jenks et Ashworth 1999).

L'analyse des variables de tolérance au gel (perte en eau, libération des électrolytes, capacité de croissance des racines, indice de Jian et teneur en eau de la partie aérienne et des racines) des semis d'épinette blanche (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées n'a pas révélé de différence significative entre les deux régies d'irrigation (25 et 40 %). Par contre, ces techniques ont généralement permis de distinguer les lots de plants lorsqu'ils sont soumis à différentes températures de congélation pendant l'endurcissement en automne dans les conditions de la pépinière. La technique la plus facile sur le plan opérationnel et en même temps peu exigeante en terme d'équipement est le suivi de la teneur en eau de la partie aérienne et des racines. Dans les conditions climatiques et sous les régies de culture de la pépinière de Grandes-Piles, des teneurs en eau de la partie aérienne de 35 % vers le début du mois de novembre permettent aux semis de tolérer des températures de -20 °C alors que des teneurs en eau des racines de 27 % confèrent à celles-ci une tolérance à des températures de -12 °C. Les deux autres

techniques, c'est-à-dire les pertes en eau des racines et l'indice de dommages de la partie aérienne calculé à partir de la conductivité électrolytique de celle dernière, demeurent des méthodes rapides pour déterminer la tolérance au gel des semis. Le choix approprié des valeurs relatives aux pertes en eau et de l'indice de dommages est intimement lié aux conditions de culture et à l'essence (Colombo *et al.* 1984, Colombo 1997). Des valeurs de pertes en eau (≤ 4) et des indices de dommages (< 1) peuvent être utilisés par les pépiniéristes comme des indicateurs de tolérance au gel. Ces tests standards d'évaluation des dommages causés par le gel aux racines et à la partie aérienne pourraient éventuellement servir dans les programmes opérationnels de qualification des plants. Cependant, ceci nécessite d'établir des chartes d'endurcissement en fonction des zones écologiques. Ces chartes permettraient aux pépiniéristes de mieux cibler les périodes de risque de dommages occasionnés par le gel et ainsi de prendre des mesures adéquates de protection. L'atout principal de ces chartes est qu'elles tiennent compte des régies réelles de culture de chaque pépinière, des provenances recommandées pour chaque zone écologique et des principales conditions environnementales (température, photopériode et humidité relative) qui régissent la phénologie des semis d'épinette blanche.

Références bibliographiques

ARGO, W. R., 1998a. *Root medium physical properties*. Hort. Technology 8 : 481-485.

ARGO, W. R., 1998b. *Root medium chemical properties*. Hort. Technology 8 : 486-494.

BALDWIN, J. P., P. B. TINKER et H. P. NYE, 1972. *Uptake of solutes by multiple root systems from soil. II. The theoretical effects of rooting density and pattern on uptake of nutrients from soil.* Plant Soil. 36 : 693-708.

BERNIER, P.Y., 1992. *Soil texture influences seedling water stress in more ways than one*. Tree Planters' Notes 43 : 39-42.

BERNIER, P.Y., et A. GONZALEZ, 1995. *Effects of the physical properties of sphagnum peat on the nursery growth of containerized* Picea mariana *and* Picea glauca *seedlings*. Scand. J. For. Res. 10 : 176-183.

BERNIER, P.Y., J.D. STEWART et A. GONZALEZ, 1995. *Effects of the physical properties of sphagnum peat on water stress in containerized* Picea mariana *seedlings under simulated field conditions*. Scand. J. For. Res. 10 : 184-189.

BIGRAS, F. et A.L. D'AOUST, 1992. *Hardening and dehardening of shoots and roots of containerized black spruce and white spruce seedlings under short and long days*. Can. J. For. Res. 22 : 388-396.

BIGRAS, F. et S. CALMÉ, 1994. *Viability tests for estimating root cold tolerance of black spruce seedlings*. Can. J. For. Res. 24 : 1039-1048.

BIGRAS, F., A. GONZALEZ, A.L. D'AOUST et C. HÉBERT, 1996. *Frost hardiness, bud phenology and growth of containerized* Picea mariana *seedlings grown at three nitrogen levels and three temperature regimes*. New Forests 12 : 243-259.

CALMÉ, S., H.A. MARGOLIS, et F.J. BIGRAS, 1993. *Influence of cultural practices on the relationship between frost tolerance and water content of containerized black spruce, white spruce, and jack pine seddlings*. Can. J. For. Res. 23 : 503-511.

COLOMBO, S.J., 1997. *Frost hardening spruce container stock for overwintering in Ontario*. New Forests 13 : 449-467.

COLOMBO, S.J., 1994. *Timing of cold temperature exposure affects root and shoot frost hardiness of Picea mariana container seedlings*. Scand. J. For. Res. 9 : 52-59.

COLOMBO, S.J., 1990. *Bud dormancy status, frost hardiness, shoot moisture content, and readiness of black spruce container seedlings for frozen storage*. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 115 : 302-307.

COLOMBO, S.J. et C. GLERUM, 1984. *Winter injury to shoots as it affects root activity in black spruce container seedlings*. Can. J. For. Res. 14 : 31-32.

COLOMBO, S.J., C. GLERUM, et D.O. WEBB, 1984. *Frost hardiness testing : an operational manual for use with extended greenhouse culture*. Ontario Ministry of Natural Resources, Forest Research Report No. 110. 14 p.

DEHAYES, D.H., M.A. INGLES et C.E. WAITE, 1989. *Nitrogen fertilization enhances cold tolerance of red spruce seedlings*. Can. J. For. Res. 19 : 1037-1043.

DURYEA, M.L. et K.M. MCCLAIN, 1984. *Altering seedling physiology to improve reforestation success*. Dans : M.L. Duryea et G.N. Brown. Seedling physiology and reforestation success. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk, Dordrecht, Boston, Londres : 77-114.

ESI., 1994. *Moisture Point, Model MP-917. Soil moisture measurement instrument. Operational Manual*. E. S. I. Environmental Sensors Inc., Victoria, C.-B. 33 p.

FLINT, H.L., B.R. BOYCE et D.U. BEATTIE, 1967. *Index of injury – a useful expression of freezing injury to plant tissues as determined by the electrolyte method*. Can. J. Plant Sci. 47 : 229-230.

FOLK, R.S. et S.C. GROSSNICKLE, 1997. *Stock quality assessment : Still an important component of operational reforestation programs*. Dans : T.D. Landis et J.R. Thompson (éds.). National Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-419. Portland, Orégon, U.S.D.A. Forest Service, Pacific Northwest Research Station : 109-119.

GINGRAS, B.-M., 1993. *Bilan provisoire des essais expérimentaux réalisés avec des récipients à parois ajourées*. Gouv. du Québec, min. des Ressources naturelles, Dir. de la rech. for. Note de recherche forestière n° 56. 14 p.

GINGRAS, B.-M. et S. RICHARD, 1999. *Bilan du développement des récipients à parois ajourées : culture des semis en pépinière et performance en plantation comparative*. Gouv. du Québec, min. des Ressources naturelles, Forêt Québec, Dir. de la rech. for. Mémoire de recherche forestière n° 130. 74 p.

GINGRAS, B.-M., D. GIRARD, M. RENAUD, S. RICHARD et G. LAMBANY, 1999. *Guide pratique pour la culture de plants de fortes dimensions d'épinette blanche dans des récipients de 350 cm³*. Gouv. du Québec, min. des Ressources naturelles, Forêt Québec, Dir. de la rech. for. Rapport interne n° 445. 31 p.

GLERUM, C., 1985. *Frost hardiness of coniferous seedlings : principles and applications*. Dans : Evaluating seedling quality : principles, procedures, and predictive abilities of major tests. Workshop held October 16-18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis : 107-123.

GROSSNICKLE, S.C., 1989. *Shoot phenology and water relations of* Picea glauca. Can. J. For. Res. 19 : 1287-1290.

GROSSNICKLE, S.C.,1988. *Planting stress in newly planted jack pine and white spruce. I. Factors influencing water uptake*. Tree Physiol. 4 : 71-83.

GROSSNICKLE, S.C. et R.S. FOLK, 1993. *Stock quality assessment : forecasting survival or performance on a reforestation site.* Tree Planters' Notes 44 : 113-121.

GROSSNICKLE, S.C., R.S. FOLK, R. RADLEY et P. AXELROOD, 1998. *Root damage assessment models for seedlings quality programs.* Dans : C.M. Kooistra, éd. Proceedings of the 1995, 1996, and 1997 annual meetings of the Forest Nursery Association of British Columbia : 32-37.

GROVES, K.M., S.L. WARREN et T.E. BILDERBACK, 1998. *Irrigation, volume, application, and controlled-release fertilizers : I. Effect on plant growth and mineral nutrient content in containerized plant production.* J. Environ. Hort. 16 : 176-181.

HAVIS, J.R., 1976. *Root hardiness of woody ornamentals.* Hort. Sci. 11 : 385-386.

HEISKANEN, J., 1995. *Irrigation regime affects water and aeration conditions in peat growth medium and the growth of containerized Scots pine seedlings.* New Forests 9 : 181-195.

HEISKANEN, J., 1993a. *Favourable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production : a review. Scand.* J. For. Res. 8 : 337-358.

HEISKANEN, J., 1993b. *Variation in water retention characteristics of peat growth media used in tree nurseries.* Silvae Fennica 27 : 77-97.

HELLERGREN, J., 1981. *Frost development in* Pinus sylvestris *in response to fertilization.* Physiol. Plant. 52 : 297-301.

HIPPS, N.A., K.H. HIGGS, L.G. COLLARD et T.J. SAMUELSON, 1994. *Effects of irrigation and nitrogen on the growth and nutrient relations of* Prunus avium *L. and 'Colt'* (Prunus avium *X* Prunus pseudocerasus) *in the nursery and after transplantation.* Ann. Sci. For. 51 : 433-445.

JENKS, M.A. et E.N. ASHWORTH, 1999. *Plant epicuticular waxes : function, production, and genetics.* Hort. Rev. 23 : 1-67.

JIAN, J., 1992. *Monitoring the development of cold tolerance in container-grown red pine and black spruce seedlings.* Thèse de maîtrise, University of Maine, Orono. 41 p.

JOBIDON, R., L. Charette et P.Y. Bernier, 1998. *Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of* Picea mariana *(Mill.) BSP seedlings planted in three different environments.* For. Ecol. Manage. 13 : 293-305.

JOHNSTON, J.R. et J.R. HAVIS, 1977. *Photoperiod and temperature effects on root cold acclimation.* J. Am. Soc. Hortic. Sci. 102 : 306-308.

KHAN, S.R., R. ROSE, D.L. HAASE et T.E. SABIN, 1996. *Soil water stress : its effects on phenology, physiology, and morphology of containerized Douglas-fir seedlings.* New Forests 12 : 19-39.

KAIRA, Y.P. et D.G. MAYNARD, 1992. *Méthodes d'analyse des sols forestiers et des tissus végétaux.* Forêts Canada. Rapport d'information NOR-X-319F.

LAMBANY, G. et L. VEILLEUX, 1999. *Système d'imagerie informatisée appliquée au développement des racines de semis d'épinette.* Gouv. du Québec, min. des Ressources naturelles, Forêt Québec, Dir. de la rech. for. Note de recherche forestière n° 97. 15 p.

LAMBANY, G., M. RENAUD et M. BEAUCHESNE, 1997. *Control of growing medium water content and its effects on small seedlings grown in large containers.* Tree Planters' Notes 48 : 48-54.

LAMBANY, G., L. ROBIDAS et P. BALLESTER, 1996. *Measurement of soil water content in a peat-vermiculite medium using time domain reflectometry (TDR) : a laboratory and field evaluation.* Tree Planters' Notes 47 : 88-93.

LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER, C. HÉBERT et R. JOBIDON, 1998. *Physiological and growth responses of three sizes of containerized* Picea mariana *seedlings outplanted with and without vegetation control.* For. Ecol. Manage.110 : 13-23.

LAMHAMEDI, M.S., P.Y. BERNIER et C. HÉBERT, 1997. *Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized* Picea mariana *seedlings under different watering regimes.* New Forests 13 : 209-223.

LANDIS, T.D., R.W. TINUS et J.P. BARNETT, 1998. *The container tree nursery manual. Volume 6, Seedling propagation.* Agric. Handbook No. 674. Washington, USDA Forest Service. 166 p.

LANDIS, T.D., R.W. TINUS, S.E. MCDONALD et J.P. BARNETT, 1989. *The container tree nursery manual. Volume 4, Seedling nutrition and irrigation.* Washington, USDA Forest Service, Agric. Handbook No. 674. 119 p.

LANGLOIS, C.-G. et L. VEILLEUX, 1988. *Extraction rapide et précise de N, P, K dans les substrats utilisés pour la culture en récipients.* Document préparé pour le Carrefour de la recherche forestière. 7 p.

LEE, S.P. et T.H.H. CHEN, 1993. *Molecular biology of plant cold hardiness development.* Dans : P.H. Li et L. Christersson, éd. Advances in plant cold hardiness. CRC Press, Inc. Boca Raton, Floride : 1-29.

LEHMANN, E.L. et H.J.M. D'ABRERA, 1975. *Non-parametrics : statistical methods based on ranks.* Holden-Day, San Francisco. 457 p.

LEVITT, J., 1980. *Responses of plants to environmental stresses. Vol. 1. Chilling, freezing and high temperature stresses.* Academic Press, New York.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1994. *Une stratégie – Aménager pour mieux protéger les forêts.* Gouvernement du Québec. 197 p.

MURRAY, M.B., J.N. CAPE et D. FOWLER, 1989. *Quantification of frost damage in plant tissues by rates of electrolytes leakage.* New Phytol. 113 : 307-311.

PALTA, J.P. et L.S. WEISS, 1993. *Ice formation and freezing injury : an overview on the survival mechanism and molecular aspects of injury and cold acclimation in herbaceous plants.* Dans : P.H. Li et L. Christersson, éd. Advances in plant cold hardiness. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida : 143-176.

PELLET, H.M. et J.V. CARTER, 1981. *Effect of nutritional factors on cold hardiness of plants.* Hort. Rev. 3 : 144-171.

PHILIPSON, J., 1988. *Root growth in Sitka spruce and Douglas-fir transplants : dependence on the shoot and stored carbohydrates.* Tree Physiol. 4 : 101-108.

PUUSTJÄRVI, V., 1976. *Peat and plant yearbook 1973-75.* Peat Research Institute, Helsinki. 50 p.

RIKALA, R. et T. REPO, 1997. *The effect of late summer fertilization on the frost hardening of second-year Scots pine seedlings.* New Forests 14 : 33-44.

RITCHIE, G.A., 1991. *Measuring cold hardiness.* Dans : J.P. Lassoie et T.M. Hinckley, éd. Techniques and approaches in forest tree ecophysiology. CRC Press, Boston : 557-582.

RITCHIE, G.A., 1990. *A rapid method for detecting cold injury in conifer seedling root systems.* Can. J. For. Res. 20 : 26-30.

RUNDEL, P.W. et W.M. JARELL, 1991. *Water in the environment.* Dans : R.W. Pearcy, J.R. Ehleringer, H.A. Mooney et P.W. Rundel, éd. Plant physiological ecology. Field methods and instrumentation. Chapman and Hall, New York : 29-56.

RUNNING, S.W. et C.P.P. REID, 1980. *Soil temperature influences on root resistance of* Pinus contorta *seedlings.* Plant Physiol. 65 : 635-640.

SCHNITZER, M., 1986. *Water retention by humic substances.* Dans : C.H. Fuchsman, éd. Peat and water, aspects of water retention and dewatering in peat. Elsevier Applied Sciences Publishers, Londres : 159-176.

SHAPIRO, S.S. et M.B. WILK, 1965. *An analysis of variance test for normality to large samples.* Applied Statistics. 31 : 115-124.

SIMPSON, D.G., 1990. *Frost hardiness, root growth capacity, and field performance relationships in interior spruce, lodgepole pine, Douglas-fir, and western hemlock seedlings.* Can. J. For. Res. 20 : 566-572.

SUTTON, R.F., 1988. *Planting stock quality is fitness for purpose.* Dans : C.R. Smith et R.J. Reffle, éd. Taking stock : the role of nursery practice in forest renewal. Great Lakes Forestry Centre, Can. For. Serv., OFRC Syposium Proc. O-P-16 : 39-43.

TIMMER, V.R. et B.D. MILLER, 1991. *Effects of contrasting fertilization and moisture regimes on biomass, nutrients, and water relations of container grown red pine seedlings.* New Forests 5 : 335-348.

TINKER, P.B., 1976. *Roots and water – transport of water to plant roots in soil.* Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. 273 : 445-461.

TOPP, D.G., J. L. DAVIS et A. P. ANNAN, 1980. *Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines*. Water Resources. Res. 3 : 547-582.

TOPP, D.G., J. L. DAVIS et A. P. ANNAN, 1982. *Electromagnetic determination of soil water content using TDR : I Applications to wetting fronts and step gradients*. Soil Sci. Soc. Amer. J. 46 : 672-684.

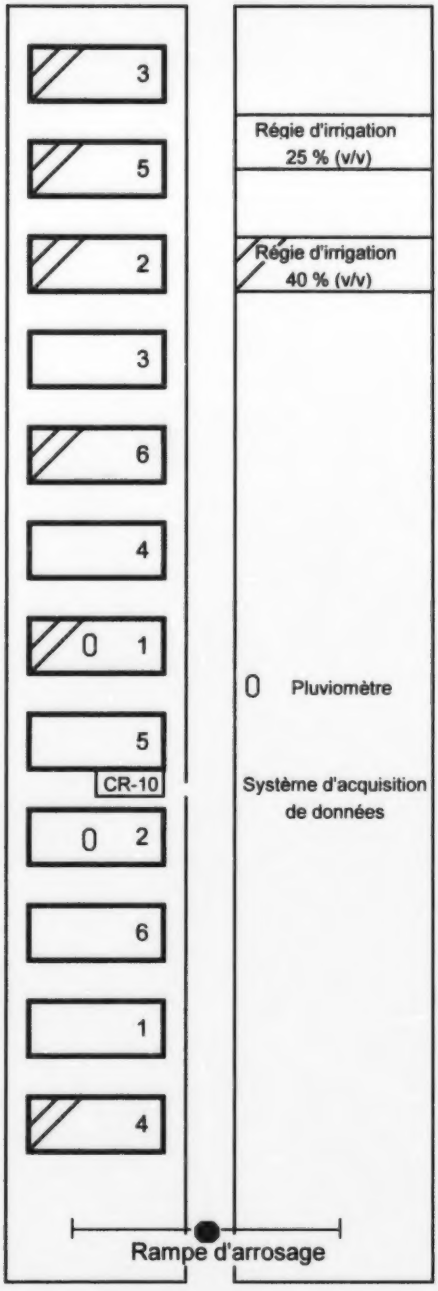
TOPP, D.G., J.L. DAVIS, W.G. BAILEY et D. ZEBCHUK, 1984. *The measurement of soil-water content using a portable TDR hand probe*. Can. J. Soil Sci. 64 : 313-321.

TYLER, H.H., S.L. WARREN et T.E. BILDERBACK, 1996. *Reduced leaching fractions improve irrigation use efficiency and nutrient efficacy*. J. Environ. Hort. 14 : 199-204.

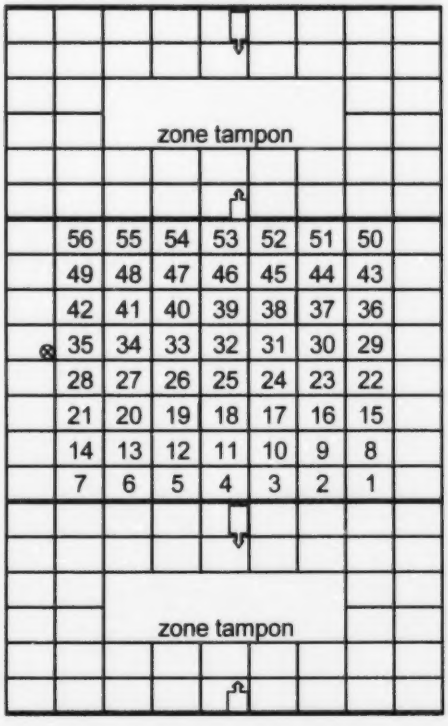
VEILLEUX, L., M. RENAUD et G. LAMBANY, 1998. *Synthèse des textes des conférences présentées dans le cadre du Colloque sur l'irrigation et la fertilisation*. Gouv. du Québec, min. des Ressources naturelles, Forêt Québec, Dir. de la recherche forestière. Document de travail. 207 p.

WALINGA , I., J.J. VAN DER LEE, V.J.G., HOUBA, W. V AN V ARK et I. NOVOSAMSKY, 1995. *Plant analysis manual*. Methode Pana-A1/1-4. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas.

Annexe 1. Dispositif expérimental implanté dans le tunnel 21 à la pépinière de Grandes-Piles en 1996



Chaque bloc est constitué de 56 récipients à parois ajourées sans tenir compte des récipients de bordure



Annexe 2. Variations des dommages foliaires (indice de Jian *) des plants d'épinette blanche (1+0) durant l'automne en fonction des régies d'irrigation (25 % et 40 %, v/v) et des températures de congélation

Régie d'irrigation (v/v)	Température de congélation (°C)	Indice de Jian * 0	1	2	3	4	5
Date : 96.09.23 (D1)							
25	T_0 = témoin	15	0	0	0	0	1
25	T_1 = -4	16	0	0	0	0	0
25	T_2 = -8	0	2	1	0	0	13
25	T_3 = -12	0	0	0	0	0	16
25	T_4 = -20	—	—	—	—	—	—
40	T_0 = témoin	14	2	0	0	0	0
40	T_1 = -4	13	2	0	0	0	1
40	T_2 = -8	0	0	0	0	0	16
40	T_3 = -12	0	0	0	0	0	16
40	T_4 = -20	—	—	—	—	—	—
Date : 96.10.07 (D2)							
25	T_0 = témoin	15	0	1	0	0	0
25	T_1 = -4	13	3	0	0	0	0
25	T_2 = -8	4	9	0	2	0	1
25	T_3 = -12	0	3	2	2	1	8
25	T_4 = -20	—	—	—	—	—	—
40	T_0 = témoin	13	3	0	0	0	0
40	T_1 = -4	13	3	0	0	0	0
40	T_2 = -8	9	3	1	0	1	2
40	T_3 = -12	2	2	0	2	1	9
40	T_4 = -20	—	—	—	—	—	—
Date : 96.10.21 (D3)							
25	T_0 = témoin	16	0	0	0	0	0
25	T_1 = -4	—	—	—	—	—	—
25	T_2 = -8	16	0	0	0	0	0
25	T_3 = -12	16	0	0	0	0	0
25	T_4 = -20	7	3	1	1	3	1
40	T_0 = témoin	15	0	0	0	0	1
40	T_1 = -4	—	—	—	—	—	—
40	T_2 = -8	16	0	0	0	0	0
40	T_3 = -12	15	1	0	0	0	0
40	T_4 = -20	8	4	1	0	3	0
Date : 96.11.04 (D4)							
25	T_0 = témoin	15	0	0	0	0	1
25	T_1 = -4	—	—	—	—	—	—
25	T_2 = -8	16	0	0	0	0	0
25	T_3 = -12	16	0	0	0	0	0
25	T_4 = -20	14	2	0	0	0	0
40	T_0 = témoin	16	0	0	0	0	0
40	T_1 = -4	—	—	—	—	—	—
40	T_2 = -8	16	0	0	0	0	0
40	T_3 = -12	16	0	0	0	0	0
40	T_4 = -20	16	0	0	0	0	0

Annexe 2. (fin)

Date : 96.11.18 (D5)							
25	T_0 = témoin	15	1	0	0	0	0
25	T_1 = -4	—	—	—	—	—	—
25	T_2 = -8	15	1	0	0	0	0
25	T_3 = -12	16	0	0	0	0	0
25	T_4 = -20	15	1	0	0	0	0
40	T_0 = témoin	16	0	0	0	0	0
40	T_1 = -4	—	—	—	—	—	—
40	T_2 = -8	15	1	0	0	0	0
40	T_3 = -12	16	0	0	0	0	0
40	T_4 = -20	13	3	0	0	0	0

* Indice de Jian :

Classe 0 : Aucun dommage à la partie aérienne ;
Classe 1 : Moins de 20 % d'aiguilles brunies ou rougies ;
Classe 2 : 21-50 % d'aiguilles rougies ou brunies ;
Classe 3 : 51-90 % d'aiguilles rougies ou brunies, bourgeon terminal mort ;
Classe 4 : Bourgeon terminal mort, la plus grande partie de la tige principale et quelques branches latérales mortes, quelques branches latérales ou aiguilles vivantes ;
Classe 5 : Partie aérienne complètement morte, pas de tissus vivants.

- Le traitement de congélation (-20 °C) n'a pas été effectué lors des dates D2 et D3 car les racines des semis n'étaient pas encore bien endurcies, alors que celui de -4 °C a été éliminé à cause de l'absence de différences significatives avec le traitement témoin (0 °C). Le traitement T_1 (-4 °C) a été remplacé par le traitement de congélation -20 °C lors des trois dernières dates afin de tenir compte du niveau supérieur d'endurcissement des plants à ces dates.

Mario Renaud est technicien forestier, diplômé du cégep de Sainte-Foy depuis 1978. À l'emploi du Ministère depuis 1979, il est présentement affecté au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie, où il assiste le chargé de recherches en physiologie végétale (production de plants).

Linda Veilleux est technicienne en chimie, diplômée du cégep de Lévis-Lauzon en 1981. De 1982 à 1984, elle a travaillé au pilotage industriel à l'usine de MAGNAQ-SNA (magnésium-amiante-Québec). Depuis 1985 elle est à l'emploi du Ministère et est présentement affectée au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie, où elle assiste le chargé de recherche en physiologie végétale (production de plants).

Serge Plamondon est technicien forestier,diplômé du cégep de Sainte-Foy depuis 1976. Employé du Ministère de 1976 à 1992, il occupe présentement un poste de technicien au Département des sciences du bois et de la forêt de la Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval.

Pour rencontrer ses objectifs de reboisement, le ministère des Ressources naturelles doit s'assurer qu'on met bien tout en œuvre pour optimiser les régies de culture lors de la production des semis en pépinière. Les recherches entreprises par le Ministère sur l'optimisation de l'irrigation, la nutrition minérale et la résistance au gel constituent des éléments essentiels à la production de plants de qualité supérieure et à la réduction des pertes de semis occasionnées par le gel. Ces travaux et ceux qu'on mène actuellement sur l'élaboration des chartes d'endurcissement en fonction des zones écologiques permettront aux pépiniéristes de mieux cibler les périodes de risque de dommages occasionnés aux plants par le gel et ainsi de prendre les mesures adéquates de protection.

Québec
Ministère des Ressources naturelles